

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS**

### **IMPLEMENTACIÓN DE CUATRO MÓDULOS DIDÁCTICOS DE TRANSFORMADORES PARA APLICACIONES TRIFÁSICAS.**

#### **TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA**

**Marcos Alexander Amagua Guallichico**

marcos.amagua@epn.edu.ec

**Juan Carlos Ante Tigasi**

juan.ante@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. ALEX FABRICIO OÑA ÑACATA, MSC.**

alex.ona@epn.edu.ec

**CODIRECTOR: ING. CARLOS ROMO HERRERA, MSC.**

carlos.romo@epn.edu.ec

**Quito, octubre 2021**

# CERTIFICACIÓN

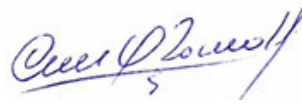
Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Amagua Guallichico Marcos Alexander y el Sr. Ante Tigasi Juan Carlos como requerimiento parcial a la obtención del título de TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA, bajo nuestra supervisión:



---

**Ing. Alex Fabricio Oña Ñacata**

DIRECTOR DEL PROYECTO



---

**Ing. Carlos Orlando Romo Herrera**

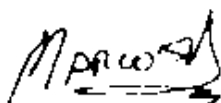
CODIRECTOR DEL PROYECTO

## DECLARACIÓN

Nosotros Amagua Guallichico Marcos Alexander con CI: 1722811849 y Ante Tigasi Juan Carlos con CI: 0503498172 declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 144 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación – COESC-, somos titulares de la obra en mención y otorgamos una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional.

Entregamos toda la información técnica pertinente, en caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



---

**Marcos Alexander Amagua Guallichico**

CI: 1722811849

Teléfono: 0992806051

Correo: marcos.amagua@epn.edu.ec



---

**Juan Carlos Ante Tigasi**

CI: 0503498172

Teléfono: 0997642930

Correo: juan.ante@epn.edu.ec

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto es dedicado a todos aquellos estudiantes técnicos, especialmente para mis compañeros electromecánicos de la ESFOT, para que puedan complementar a nivel práctico los conocimientos impartidos en las aulas, esto, con la ayuda de los módulos didácticos de transformadores del laboratorio de Máquinas Electricas de la ESFOT, además, podrán referenciarse en este documento para facilitar las practicas que se realizaran y familiarizarse con estas máquinas.

**Marcos Alexander Amagua Guallichico**

## **AGRADECIMIENTO**

En primera instancia gracias a Dios por acompañarme y bendecirme en este arduo camino estudiantil, a mi familia porque han sido el apoyo incondicional para mi crecimiento. A mis padres Carmen Guallichico y Marco Amagua por su sacrificio, amor, comprensión y sobre todo por los consejos, que me ayudaron a sobresalir de este difícil camino, gracias por ser el apoyo en los difíciles momentos por estar presente en cada triunfo y en cada derrota y por nunca dejarme solo.

Un Agradecimiento fraterno a la Escuela Politécnica Nacional que me acogió en sus instalaciones como mi segundo hogar y me abrió las puertas para cumplir mi sueño. A los ingenieros que gracias a ellos y a todos los conocimientos que recibí me ayudó a ser mejor profesional y mejor persona.

A mi director que gracias a sus consejos y explicaciones se logró realizar el presente proyecto. A todos mi amigos y compañeros que conocí en las aulas que siempre estaban para brindarme su amistad y llenarme de buenos recuerdos que los llevaré conmigo por el resto de mi vida.

**Marcos Alexander Amagua Guallichico**

# **DEDICATORIA**

Dedicado a la ínclita Escuela de Formación de Tecnólogos "ESFOT".

**J. Carlos Ante**

# AGRADECIMIENTO

Profundo agradecimiento:

Al Dios Infinito por concederme esta gratificante oportunidad de aprendizaje.

Al director del proyecto por su trascendental aporte para la conclusión exitosa de este trabajo.

A mi familia, en especial a mí apreciada madre María Natividad por su confianza en mí.

A mi gran amiga Rebeca a quien valoro mucho por su apoyo constante en el desarrollo de este proyecto.

Al Ing. Alfredo Falconi jefe de ALFA ELECTRÓNICA por sus acertadas sugerencias.

**J. Carlos Ante**

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción .....	1
1.1	Objetivo general .....	2
1.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Fundamentos .....	2
2	Metodología.....	5
2.1	Descripción de la metodología usada .....	5
3	Resultados y Discusión .....	7
3.1	Conceptos Teóricos de Transformadores Trifásicos.....	7
	Transformador Monofásico .....	7
	Transformador Trifásico.....	7
	Circuito equivalente exacto.....	8
	Circuito equivalente aproximado .....	10
	Pruebas en el Transformador .....	11
	Conexiones de los Transformadores .....	17
3.2	Cálculo del Transformador Trifásico .....	20
	Requerimientos, potencia y voltaje de alimentación .....	21
	Sección del núcleo .....	21
	Selección de la chapa magnética.....	22
	Carrete de plástico .....	23
	Flujo magnético.....	24
	Potencia devanado primario .....	24
	Intensidad del bobinado primario .....	25
	Intensidad del devanado secundario .....	25
	Potencia de pérdida en el transformador .....	26
	Resistencia óhmica para bobinado primario .....	26
	Resistencia óhmica para bobinado secundario.....	26
	Tensión de fase primaria en triángulo.....	27



Tensión de fase secundaria en triángulo .....	27
Número de espiras del bobinado primario .....	27
Número de espiras del bobinado secundario .....	28
Sección del hilo del bobinado primario .....	28
Sección del hilo del bobinado secundario .....	29
Diámetro del conductor primario .....	29
Diámetro del conductor secundario .....	29
Elección del conductor .....	30
3.3 Implementación del Transformador Trifásico .....	31
Construcción del carrete .....	31
Construcción de las bobinas .....	32
Armado del núcleo magnético .....	33
3.4 Pruebas y Análisis de Resultados .....	36
Prueba de continuidad .....	37
Medición de resistencia en los devanados .....	38
Prueba de relación de transformación .....	40
Prueba de polaridad .....	40
Prueba de circuito abierto .....	41
Prueba de cortocircuito .....	43
Determinación de los parámetros .....	44
Cálculo de la Eficiencia .....	47
Conexiones Trifásicas .....	48
3.5 Hojas Guía para prácticas de laboratorio .....	54
3.6 Manual de Uso y Mantenimiento .....	54
4 Conclusiones y Recomendaciones .....	55
4.1 Conclusiones .....	55
4.2 Recomendaciones .....	56
5 Referencias Bibliográficas .....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Transformador trifásico tipo núcleo. ....	2
<b>Figura 1.2</b>	Fragments de chapas monofásicas acoplado para chapas trifásicas. ....	3
<b>Figura 1.3</b>	Bobina del módulo de transformador trifásico. ....	3
<b>Figura 1.4</b>	Esquema del transformador trifásico. ....	4
<b>Figura 3.1</b>	Esquema del transformador monofásico. ....	7
<b>Figura 3.2</b>	Transformador trifásico de tres columnas. ....	8
<b>Figura 3.3</b>	Circuito equivalente exacto de un transformador monofásico práctico. ....	8
<b>Figura 3.4</b>	Circuito equivalente exacto visto desde el lado primario. ....	9
<b>Figura 3.5</b>	Circuito equivalente aproximado de un transformador. ....	10
<b>Figura 3.6</b>	Circuito equivalente aproximado visto desde el lado primario. ....	11
<b>Figura 3.7</b>	Transformador sometido a prueba de polaridad. ....	12
<b>Figura 3.8</b>	Marcas de polaridad en el módulo T1. ....	12
<b>Figura 3.9</b>	Medición de la resistencia óhmica en los devanados. ....	13
<b>Figura 3.10</b>	Ensayo de circuito abierto monofásico. ....	14
<b>Figura 3.11</b>	Circuito equivalente aproximado en condiciones de circuito abierto. ....	14
<b>Figura 3.12</b>	Ensayo de cortocircuito monofásico. ....	16
<b>Figura 3.13</b>	Circuito equivalente aproximado en condiciones de cortocircuito. ....	16
<b>Figura 3.14</b>	Conexión $\Delta$ - $\Delta$ . ....	18
<b>Figura 3.15</b>	Conexión Y-Y. ....	18
<b>Figura 3.16</b>	Conexión $\Delta$ -Y. ....	19
<b>Figura 3.17</b>	Conexión Y- $\Delta$ . ....	19
<b>Figura 3.18</b>	Conexión Dy5. ....	20
<b>Figura 3.19</b>	Dimensiones de las chapas magnéticas. ....	22
<b>Figura 3.20</b>	Dimensiones establecidas de las chapas magnéticas. ....	23
<b>Figura 3.21</b>	Dimensiones carrete de plástico. ....	24
<b>Figura 3.22</b>	Carrete de plástico y dimensiones. ....	32
<b>Figura 3.23</b>	Proceso de bobinado. ....	32
<b>Figura 3.24</b>	Devanado completo de una columna correctamente aislada. ....	33
<b>Figura 3.25</b>	(a) Chapa monofásica. (b) Chapa trifásica obtenida. ....	33
<b>Figura 3.26</b>	Núcleo armado. (a) Vista frontal. (b) Vista superior. (c) Vista isométrica. ....	34
<b>Figura 3.27</b>	Borneras de conexión. ....	34
<b>Figura 3.28</b>	Componentes de protección para el transformador. ....	35
<b>Figura 3.29</b>	Estante de transformadores trifásicos. ....	35

<b>Figura 3.30</b>	Designación de transformadores monofásicos. ....	36
<b>Figura 3.31</b>	Diagrama esquemático para la prueba de continuidad.....	37
<b>Figura 3.32</b>	Prueba de continuidad.....	37
<b>Figura 3.33</b>	Diagrama de conexión para medir resistencia. ....	38
<b>Figura 3.34</b>	Resistencia en el devanado. ....	39
<b>Figura 3.35</b>	Diagrama de conexión para obtener la polaridad. ....	41
<b>Figura 3.36</b>	Marcas de polaridad.....	41
<b>Figura 3.37</b>	Prueba de circuito abierto.....	42
<b>Figura 3.38</b>	Prueba de cortocircuito.....	43
<b>Figura 3.39</b>	Circuito equivalente exacto obtenido. ....	46
<b>Figura 3.40</b>	Conexión Delta-Delta del módulo T1.....	48
<b>Figura 3.41</b>	Conexión Estrella-Estrella del módulo T1.....	50
<b>Figura 3.42</b>	Conexión Delta-Estrella del módulo T1. ....	51
<b>Figura 3.43</b>	Conexión Estrella- Delta del módulo T1. ....	53
<b>Figura 3.44</b>	QR del manual de uso y mantenimiento de los módulos. ....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b> Datos iniciales para el dimensionamiento. ....	21
<b>Tabla 3.2</b> Dimensiones para chapas magnéticas en milímetros (mm) . ....	22
<b>Tabla 3.3</b> Características de los conductores para transformadores . ....	30
<b>Tabla 3.4</b> Cantidad de material por módulo.....	31
<b>Tabla 3.5</b> Características del transformador.....	36
<b>Tabla 3.6</b> Resultados Prueba de Continuidad. ....	38
<b>Tabla 3.7</b> Valores de resistencia en los devanados. ....	39
<b>Tabla 3.8</b> Datos de la Prueba de Relación de Transformación.....	40
<b>Tabla 3.9</b> Datos de la prueba de circuito abierto módulo T1.....	42
<b>Tabla 3.10</b> Datos de la prueba de cortocircuito módulo T1. ....	44
<b>Tabla 3.11</b> Datos obtenidos en las pruebas de circuito abierto y cortocircuito.....	44
<b>Tabla 3.12</b> Resultados de la conexión Delta-Delta. ....	49
<b>Tabla 3.13</b> Resultados de la conexión Estrella-Estrella.....	50
<b>Tabla 3.14</b> Resultados de la conexión Delta-Estrella. ....	52
<b>Tabla 3.15</b> Resultados de la conexión Estrella-Delta. ....	53

## RESUMEN

El presente proyecto tuvo como finalidad implementar cuatro módulos didácticos de transformadores para aplicaciones trifásicas, mismos que están ubicados en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT) aula 33, para dotar del equipamiento necesario y permitir a los estudiantes realizar prácticas en las cuales apliquen los conocimientos adquiridos en la asignatura de Fundamentos de Máquinas Eléctricas (TEMR333), correspondiente a la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica de la ESFOT.

El presente documento se divide en 4 capítulos que se detallan a continuación:

Introducción, en este capítulo se explica brevemente el contenido del proyecto donde se detalla, la problemática, el enfoque y la importancia. Seguidamente se plantean los objetivos a ser alcanzados en el proyecto.

Metodología, en este apartado se explica cronológicamente el proceso a seguir para definir los parámetros de diseño, construcción, pruebas, manuales y los criterios necesarios para el transformador trifásico.

Resultados y Discusión, en esta sección se definen los parámetros de diseño y se realizan los cálculos correspondientes. Se presenta el proceso de construcción de los módulos y las pruebas requeridas que avalan su funcionamiento.

Conclusiones y recomendaciones, en este capítulo se evalúan las pruebas realizadas a los transformadores, se verifican los objetivos alcanzados y se evidencian las prestaciones que ofrece el módulo en la realización de las prácticas de laboratorio, donde, los estudiantes pueden corroborar sus conocimientos adquiridos en el tema de transformadores. Para finalizar se redacta una serie de recomendaciones en apoyo a personas interesadas en desarrollar un proyecto similar.

**PALABRAS CLAVE:** Transformador trifásico, potencia aparente, conexiones trifásicas, transformadores.

# ABSTRACT

The purpose of this project was to implement four didactic modules of transformers for three-phase applications, which are located in the Electrical Machines laboratory of the Technologists Training School (ESFOT) classroom 33, to provide the necessary equipment and thus allow students carry out practices in which they apply the knowledge acquired in the subject of Fundamentals of Electrical Machines (TEMR333), corresponding to the Higher Technology in Electromechanics career at ESFOT.

This document is divided into 4 chapters that are detailed below:

Introduction, this chapter briefly explains the content of the project where it is detailed, the problems, the focus and the importance. The objectives to be achieved in the project are then set out.

Methodology: this section chronologically explains the process to follow to define the design parameters, construction, tests, manuals and the necessary criteria for the three-phase transformer.

Results and Discussion, in this section the design parameters are defined and the corresponding calculations are carried out. The module construction process and the required tests that support their operation are presented.

Conclusions and recommendations, in this chapter the tests carried out on the transformers are evaluated, the objectives achieved are verified and the benefits offered by the module in carrying out the laboratory practices are evidenced, where students can corroborate their knowledge acquired in the transformer theme. Finally, a series of recommendations are written to support people interested in developing a similar project.

KEY WORDS: Three-phase transformer, apparent power, three-phase connections, transformers.

# 1 INTRODUCCIÓN

Los transformadores trifásicos son de gran importancia en la industria eléctrica, ya que, gracias a ellos, es posible transmitir y distribuir energía eléctrica a grandes distancias de manera económica.

Actualmente, la Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT) no cuenta con laboratorios de Máquinas Eléctricas, por lo que las prácticas se las realizan en la facultad de Ingeniería Eléctrica en horarios impuestos por la jefatura del laboratorio; esto genera complicaciones de accesibilidad a los estudiantes de la ESFOT. Considerando este factor, la construcción de los módulos didácticos para realizar prácticas en transformadores trifásicos, constituye una necesidad para los estudiantes, ya que en el perfil del Tecnólogo Superior Electromecánico se requieren conocimientos prácticos en la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica que serán de gran utilidad en su etapa laboral.

En la implementación del módulo didáctico se inició con el estudio del mercado para la adquisición de los materiales, donde, el principal problema fue la obtención de la chapa trifásica, por lo cual, se optó por adecuar chapas monofásicas para obtener chapas trifásicas. Seguidamente se realizó la construcción de los carretes de plástico en función de las medidas de las chapas obtenidas, para posteriormente construir los devanados del transformador con alambre de cobre correctamente aislados primario del secundario mediante el uso de papel Prespan. Finalmente, se ensambló el transformador y se aportó un recubrimiento de barniz para brindar una mayor protección al transformador.

A través del desarrollo del proyecto se provee equipamiento adecuado, donde, los estudiantes de Tecnología Superior en Electromecánica pongan en práctica los conocimientos teóricos en el laboratorio, que estará ubicado en la Escuela Politécnica Nacional en la Facultad de la Escuela de Formación de Tecnólogos, aula 33.

En el Anexo 1 se adjunta el certificado de funcionamiento del proyecto que cumple con los requerimientos de diseño y parámetros necesarios para que los usuarios de la ESFOT utilicen las instalaciones con seguridad para los equipos y las personas.

## 1.1 Objetivo general

Implementar cuatro módulos didácticos de transformadores para aplicaciones trifásicas.

## 1.2 Objetivos específicos

Revisar los conceptos teóricos de los transformadores trifásicos.

Establecer los requerimientos de voltajes, corrientes y potencia aparente para los transformadores.

Construir los módulos de transformadores.

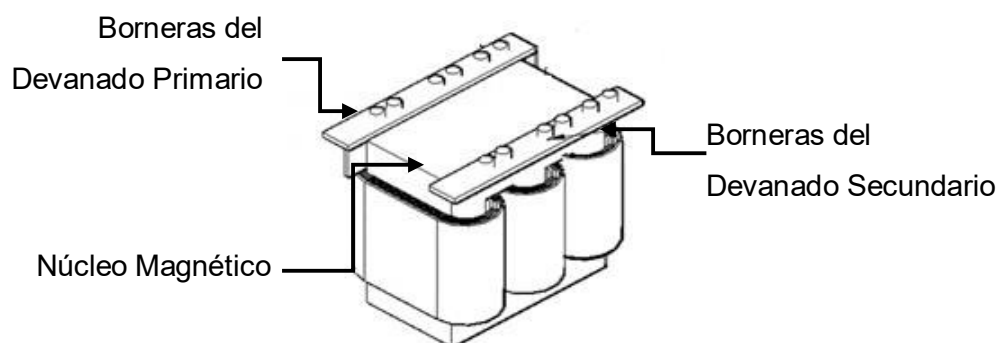
Efectuar las pruebas de funcionamiento del módulo de transformadores.

Realizar el manual de uso y mantenimiento, así como las hojas guías para prácticas de laboratorio.

## 1.3 Fundamentos

El transformador es una de las máquinas más utilizadas en la industria eléctrica y una de sus principales funciones es aislar un circuito de otro [1]. El transformador consta de varias aplicaciones, pero generalmente se utiliza en los equipos que requieren adaptar las tensiones normalizadas suministradas por la empresa eléctrica a las requeridas por los equipos. Además, al ser una máquina estática no tiene pérdidas de efecto mecánico, por lo tanto, puede alcanzar rendimientos de hasta un 98%.

En la construcción de un transformador se destacan dos principales circuitos: circuito eléctrico y circuito magnético [1]. Existen dos tipos de construcción para transformadores: tipo núcleo y tipo acorazado, para el presente proyecto se realizó la construcción tipo núcleo, donde, los devanados están efectuados en la misma columna como se muestra en la Figura 1.1 [2].



**Figura 1.1** Transformador trifásico tipo núcleo.



Un transformador trifásico tipo núcleo tiene mayor facilidad de construcción y menor peso, además, los costos se reducen en comparación al de tipo acorazado.

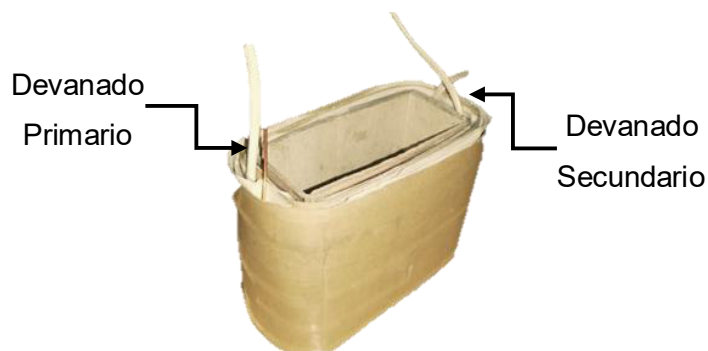
La construcción del circuito magnético está compuesto por las chapas magnéticas de acero al silicio de grano orientado, por sus excelentes características permeables [3]. En la Figura 1.2 se observan estas chapas, de tal forma que el empilado de las mismas constituye el núcleo magnético del transformador.

Existen diferentes tipos de chapas magnéticas para transformadores monofásicos; sin embargo, para transformadores trifásicos es más complicado. En la Figura 1.2 se observa el acoplamiento de fragmentos de chapas monofásicas para obtener chapas trifásicas y así conformar el núcleo magnético.



**Figura 1.2** Fragmentos de chapas monofásicas acoplado para chapas trifásicas.

Para la construcción de los devanados del transformador, primero se arrolla la bobina secundaria, posteriormente, se coloca el cartón o papel aislante (prespan), para comenzar con el arrollamiento del devanado primario. En la Figura 1.3 se observa la bobina ya construida.

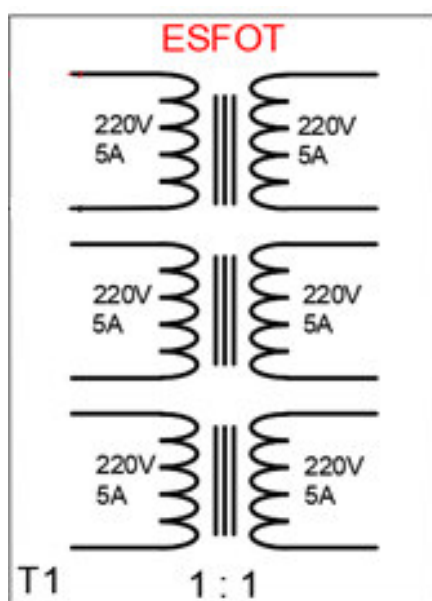


**Figura 1.3** Bobina del módulo de transformador trifásico.

El transformador trifásico consta de tres transformadores monofásicos contruidos en el mismo núcleo, donde, el devanado primario independientemente de que tenga más o menos vueltas es el que se conecta a la fuente de alimentación trifásica.

Para la construcción de los módulos didácticos de transformadores se consideraron tres transformadores monofásicos de relación 1:1, al ser un módulo didáctico de aplicación trifásica permitirá realizar conexiones trifásicas generalmente en estrella o delta, además, pueden ser conectados en serie o paralelo dependiendo del requerimiento de uso.

En la Figura 1.4 se muestra el esquema del módulo.



**Figura 1.4** Esquema del transformador trifásico.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Descripción de la metodología usada

Se realizó una revisión completa de los conceptos y características más elementales de los transformadores trifásicos, basándose en libros y proyectos detallados en la bibliografía. Se revisaron las expresiones y criterios válidos para la construcción del módulo. Una vez dotados de información se analizaron los requerimientos necesarios de los módulos didácticos del presente proyecto.

Se estableció la carga a la que estará sometido el módulo, en la que se considera cargas comúnmente usados en los laboratorios de la ESFOT como por ejemplo motores trifásicos de hasta  $\frac{3}{4}$  (HP) y cargas resistivas de baja potencia, en la que se concluyó el valor de 1.9 (KVA) como potencia aparente. Basándose en la carga mencionada y los parámetros de voltaje de alimentación, se dimensionaron y seleccionaron los elementos constitutivos y constructivos del módulo. Así mismo, se realizó el diseño de los planos esquemáticos eléctricos requeridos para los módulos.

Se estableció el voltaje de alimentación de línea de 220 (V), voltaje que se maneja en los laboratorios de la ESFOT. Considerando que el módulo es de uso didáctico la relación de transformación se define de 1:1, ya que así los estudiantes podrán poner en práctica las conexiones trifásicas aprendidas en la teoría.

Los elementos de construcción fueron obtenidos mediante el análisis de los parámetros de diseño, además, fue necesario realizar un estudio de mercado para optar por los mejores precios y buena calidad. En el transformador primero se construyó el núcleo, donde, se utilizó el material ferromagnético acero de silicio comúnmente denominado chapa magnética, sin embargo, se tuvieron que modificar chapas monofásicas para elaborar chapas trifásicas. En este proyecto para la construcción de los carretes se utilizó material aislante de plástico en forma de planchas.

El devanado del transformador se construyó con alambre de cobre esmaltado calibre 15 AWG debido a la corriente obtenida en los cálculos en el diseño del transformador, y así finalmente implementar los módulos.

Para asegurar el debido cuidado de los transformadores se construyó una estructura metálica que sirve como estantería, donde, reposarán cada uno de los módulos implementados.

Posteriormente, se realizaron las pruebas que verifiquen el funcionamiento de los módulos, para lo cual se consideraron las siguientes:

1. Pruebas de Continuidad
2. Pruebas de Relación de Transformación
3. Pruebas de Polaridad
4. Pruebas de Resistencia en los Devanados
5. Pruebas de Cortocircuito
6. Pruebas de Circuito Abierto

Donde, cada una de las pruebas mencionadas avalan el funcionamiento adecuado de cada uno de los módulos implementados.

Para finalizar, se elaboró el manual de funcionamiento y mantenimiento de los transformadores, basándose en las características de las máquinas y los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento. También, se realizó una hoja guía correspondiente para la ejecución de la práctica de laboratorio que se pueden efectuar en los módulos.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

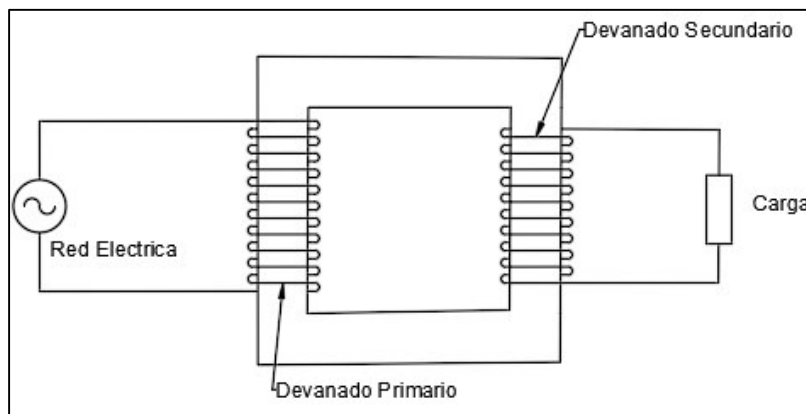
En el presente proyecto se construyeron cuatro módulos didácticos para aplicaciones trifásicas, donde, fue necesario realizar la revisión de conceptos teóricos de transformadores monofásicos y trifásicos para realizar los cálculos pertinentes que definan todos los aspectos eléctricos y mecánicos del módulo; además, se realizaron pruebas de funcionamiento que ayudaron a verificar las características más elementales del transformador como son: la eficiencia y los parámetros eléctricos del transformador.

En la presente sección se detalla el proceso de construcción e implementación de cada módulo haciendo énfasis a los objetivos previamente planteados.

#### 3.1 Conceptos Teóricos de Transformadores Trifásicos

##### Transformador Monofásico

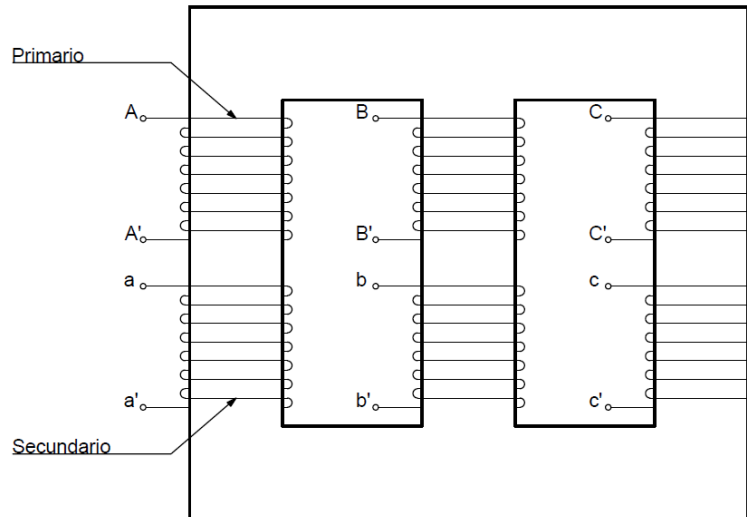
Es un dispositivo que permite la conversión de un nivel de voltaje a otro nivel de voltaje mediante la acción de un campo magnético. Está compuesto por dos bobinas de alambre conductor devanadas en un núcleo ferromagnético común según se muestra en la Figura 3.1 [4].



**Figura 3.1** Esquema del transformador monofásico.

##### Transformador Trifásico

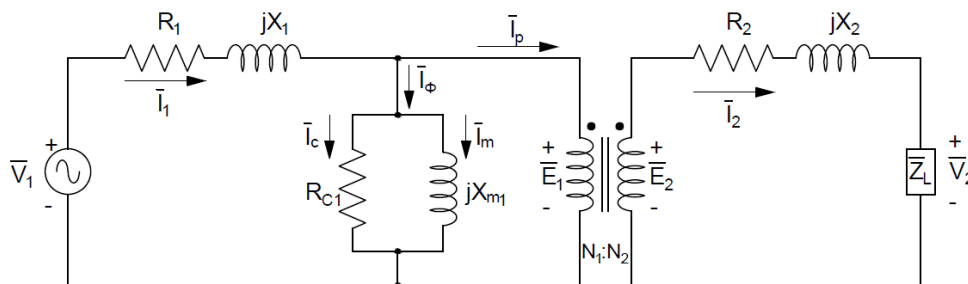
Actualmente, en la transmisión de energía a largas distancias y a nivel industrial se utilizan más los transformadores trifásicos por su capacidad de manejar altas potencias [1]. En la Figura 3.2 se observa el esquema de un transformador trifásico, donde, los devanados primarios y secundarios están contenidos en un núcleo común constituido por tres columnas, que es precisamente el modelo en el cual se basa este proyecto.



**Figura 3.2** Transformador trifásico de tres columnas.

### Circuito equivalente exacto

Debido a la gran importancia de los transformadores trifásicos, se desprende la necesidad de establecer un modelo que permita hacer su análisis, esto se logra a través del análisis del modelo del transformador monofásico, representado en la Figura 3.3 considerando que un transformador trifásico es semejante a tener tres transformadores monofásicos de las mismas características interconectados, esto permite estudiar cada una de las fases.



**Figura 3.3** Circuito equivalente exacto de un transformador monofásico práctico.

Donde:

- $\bar{V}_1$  : (V) Fasor de voltaje de fase del primario (rms)
- $\bar{V}_2$  : (V) Fasor de voltaje de fase del secundario (rms)
- $\bar{E}_1$  : (V) Fasor de la fuerza electromotriz primaria por fase (rms)
- $\bar{E}_2$  : (V) Fasor de la fuerza electromotriz secundaria por fase (rms)
- $\bar{I}_1$  : (A) Fasor de corriente de línea primaria (rms)
- $\bar{I}_2$  : (A) Fasor de corriente de línea secundaria (rms)

- $\bar{I}_\phi$  : (A) Fasor de corriente de excitación (rms)
- $\bar{I}_c$  : (A) Fasor de corriente de pérdida en el núcleo (rms)
- $\bar{I}_m$  : (A) Fasor de corriente de magnetización (rms)
- $\bar{I}_p$  : (A) Fasor de corriente secundaria representada en el lado primario (rms)
- $R_1$  : ( $\Omega$ ) Resistencia devanado primario
- $R_2$  : ( $\Omega$ ) Resistencia devanado secundario
- $jX_1$  : ( $\Omega$ ) Reactancia de dispersión del devanado primario
- $jX_2$  : ( $\Omega$ ) Reactancia de dispersión del devanado secundario
- $R_{c1}$  : ( $\Omega$ ) Resistencia equivalente de pérdida en el núcleo
- $jX_{m1}$  : ( $\Omega$ ) Reactancia de magnetización
- $\bar{Z}_L$  : ( $\Omega$ ) Impedancia de carga
- $N_1$  : Número de espiras del primario
- $N_2$  : Número de espiras del secundario

La relación de transformación está definida por: la relación entre el número de espiras del devanado primario y el número de espiras del devanado secundario. De manera general se expresa según la Ecuación 3.1.

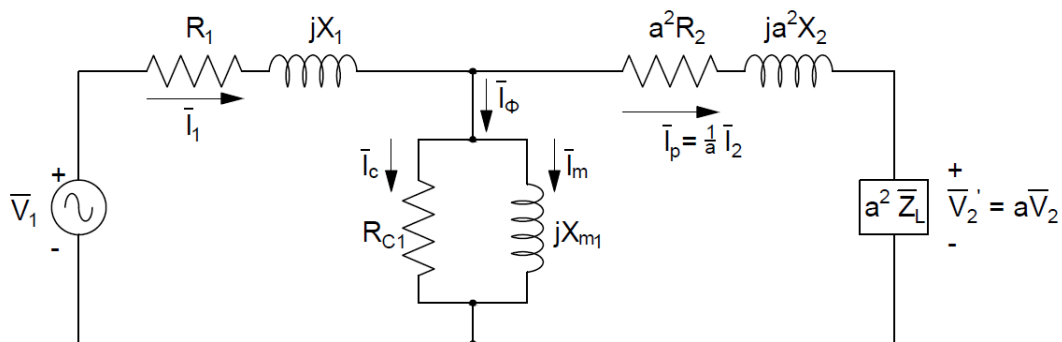
$$\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

**Ecuación 3.1** Relación de transformación [2].

Donde:

- $a$  : Relación de transformación

A nivel analítico, es posible representar el circuito equivalente de un transformador con referencia a un devanado específico, es decir, visto desde el lado primario o visto desde el lado secundario, generalmente se representa visto desde el lado primario como se muestra en la Figura 3.4.



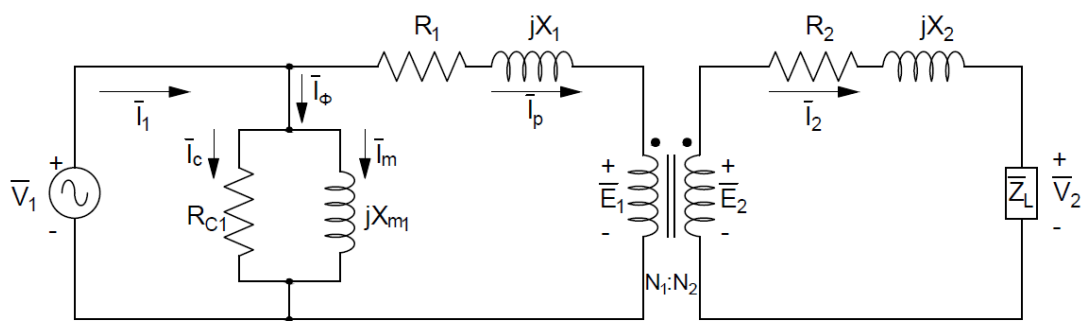
**Figura 3.4** Circuito equivalente exacto visto desde el lado primario.

Como se aprecia en la Figura 3.4 las impedancias del circuito que se encontraban en el lado secundario en la Figura 3.3 han sido trasladadas al lado primario obteniéndose un circuito más simplificado.

### Circuito equivalente aproximado

En el diseño de los transformadores, los fabricantes siempre buscan que las resistencias de los devanados, las reactancias de dispersión y la pérdida en el núcleo permanezcan lo más bajo posible. Con el fin de un análisis más simplificado se tiene el modelo aproximado, donde, se considera una impedancia alta en el ramal paralelo en comparación a las impedancias de los devanados primario y secundario.

La caída de voltaje es mínima en las impedancias de los devanados por lo que se puede considerar nula, por lo tanto, el voltaje en la rama paralela es igual al voltaje aplicado, esto permite obtener el circuito equivalente aproximado mostrado en la Figura 3.5.



**Figura 3.5** Circuito equivalente aproximado de un transformador.

Al circuito equivalente aproximado también se puede representar referido al primario o al secundario. A continuación se presenta el circuito equivalente aproximado visto desde el lado primario (Figura 3.6), donde:

$$\bar{Z}_{e1} = R_{e1} + jX_{e1}$$

**Ecuación 3.2** Impedancia equivalente referida al primario [2].

$$R_{e1} = R_1 + a^2 R_2$$

**Ecuación 3.3** Resistencia equivalente referida al primario [2].

$$X_{e1} = X_1 + a^2 X_2$$

**Ecuación 3.4** Reactancia equivalente referida al primario [2].

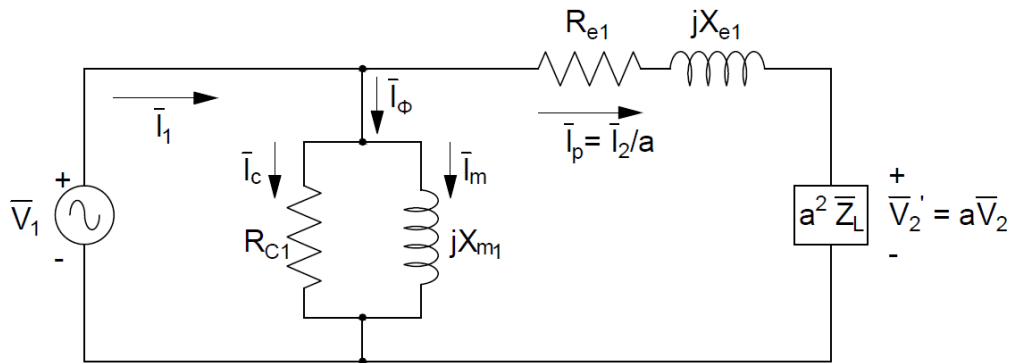


Donde:

$\bar{Z}_{e1}$  : ( $\Omega$ ) Impedancia equivalente vista desde el primario

$R_{e1}$  : ( $\Omega$ ) Resistencia equivalente vista desde el primario

$X_{e1}$  : ( $\Omega$ ) Reactancia equivalente vista desde el primario



**Figura 3.6** Circuito equivalente aproximado visto desde el lado primario.

### Pruebas en el Transformador

Las pruebas más elementales que se realizan a los transformadores para comprobar el funcionamiento y a la vez dar mantenimiento son: Prueba de continuidad, Prueba de relación de transformación, Prueba de Polaridad y Medición de la resistencia de los devanados.

Sin embargo, para poder determinar los parámetros del transformador, es necesario realizar las pruebas de: circuito abierto y cortocircuito.

#### Prueba de continuidad

Esta prueba es la medición más simple que se realiza a un transformador, consiste en medir una resistencia muy baja (idealmente cero ohmios) en el devanado del transformador y probar su continuidad [5].

La prueba de continuidad sirve específicamente para comprobar el buen estado de los conductores y fusibles.

#### Prueba de relación de transformación

En la prueba de relación de transformación se comprueba que los devanados del transformador contienen el número de vueltas adecuado para proporcionar los niveles de tensión requeridos [6].

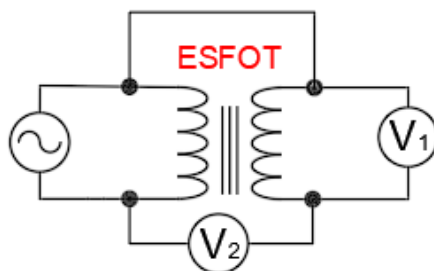
La relación de transformación se la obtiene con la Ecuación 3.5 y es una medida del valor de tensión aplicado a las terminales del primario sobre el valor de tensión medido en las terminales del secundario.

$$a = \frac{V_1}{V_2}$$

**Ecuación 3.5** Relación de transformación.

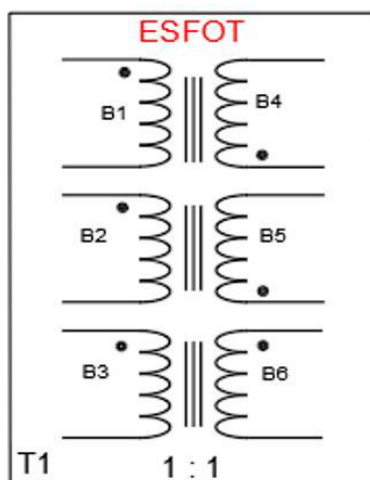
### Prueba de polaridad

Es importante conocer la polaridad, ya que su principal función radica en acoplar los devanados del transformador en serie o paralelo y así poder efectuar conexiones. La identificación de la polaridad se realiza alimentando una bobina y midiendo los voltajes de acuerdo al diagrama de conexiones mostrado en la Figura 3.7.



**Figura 3.7** Transformador sometido a prueba de polaridad.

Si el voltaje medido en  $V_2$  es mayor que el voltaje en  $V_1$  la polaridad es aditiva, si el voltaje medido en  $V_2$  es menor que el voltaje en  $V_1$  la polaridad es sustractiva. En cada caso de polaridad se marca con un punto el terminal de polaridad y con un no punto el de no polaridad como se muestra en la Figura 3.8.

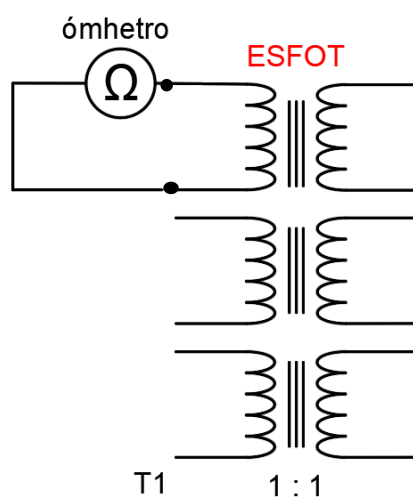


**Figura 3.8** Marcas de polaridad en el módulo T1.

### Medida de la resistencia de los devanados

Con la tecnología actual existen aparatos electrónicos que son muy precisos y han suprimido los métodos tradicionales de medida, pues los óhmetros digitales proporcionan el valor de la resistencia en los devanados del transformador directamente en su pantalla, con solo conectar el óhmetro al transformador [1].

Para realizar la medición se conecta el óhmetro a los terminales de cada devanado como se muestra en la Figura 3.9.



**Figura 3.9** Medición de la resistencia óhmica en los devanados.

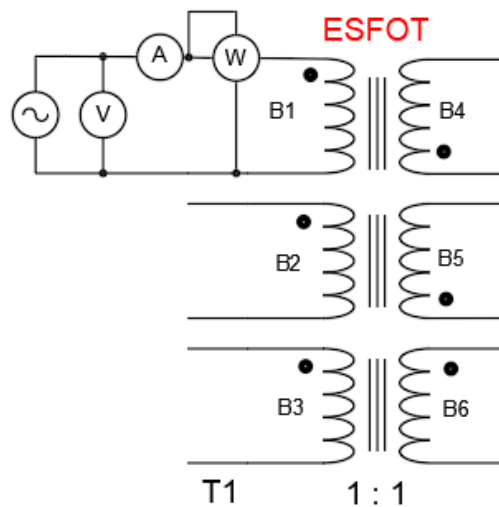
### Prueba de circuito abierto

Para determinar los parámetros en circuito abierto del transformador trifásico es posible realizar el análisis por cada una de las fases, considerando que el módulo está compuesto por tres transformadores monofásicos de similares características.

La prueba de circuito abierto se realiza en cada uno de los tres transformadores que componen el transformador trifásico, sin embargo, para determinar los parámetros se puede elegir indistintamente uno de los tres transformadores monofásicos.

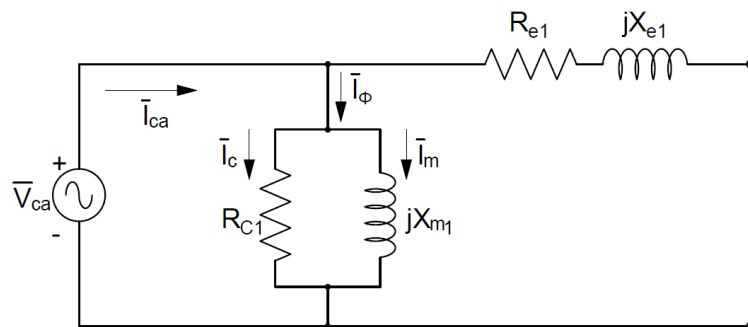
Esta prueba básicamente determina las pérdidas en el núcleo que son ocasionadas por la corriente que se induce en la chapa magnética provocando el calentamiento del transformador y por ende en potencia pérdida en el hierro [1]. Esta prueba es recomendable realizarla en el lado de bajo voltaje dejando el lado de alto voltaje en circuito abierto; pero, cuando la relación de transformación es de 1:1 esta prueba se puede realizar indistintamente en cualquiera de los dos lados, para este caso se trabaja en el lado primario dejando el lado secundario en circuito abierto.

Para realizar esta prueba se debe seguir el diagrama mostrado en la Figura 3.10.



**Figura 3.10** Ensayo de circuito abierto monofásico.

El circuito equivalente aproximado visto desde el lado primario en el ensayo de circuito abierto es el que se muestra en la Figura 3.11.



**Figura 3.11** Circuito equivalente aproximado en condiciones de circuito abierto.

Para determinar los valores de la resistencia de pérdida en el núcleo ( $R_{c1}$ ) y la reactancia de magnetización ( $jX_{m1}$ ), se debe calcular la potencia aparente y la potencia reactiva, sin carga, con las siguientes ecuaciones.

$$S_{ca} = V_{ca} * I_{ca}$$

**Ecuación 3.6** Potencia aparente sin carga.

$$Q_{ca} = \sqrt{S_{ca}^2 - P_{ca}^2}$$

**Ecuación 3.7** Potencia reactiva sin carga.

Donde:

$S_{ca}$  : (VA) Potencia aparente en circuito abierto

$V_{ca}$  : (V) Voltaje en circuito abierto

$I_{ca}$  : (A) Corriente en circuito abierto

$Q_{ca}$  : (VAR) Potencia reactiva en circuito abierto

$P_{ca}$  : (W) Potencia activa en circuito abierto

Luego, los valores de la resistencia de pérdida en el núcleo y la reactancia de magnetización se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$R_{C1} = \frac{V_{ca}^2}{P_{ca}}$$

**Ecuación 3.8** Resistencia de pérdida en el núcleo.

$$X_{m1} = \frac{V_{ca}^2}{Q_{ca}}$$

**Ecuación 3.9** Reactancia de magnetización.

### **Prueba de cortocircuito**

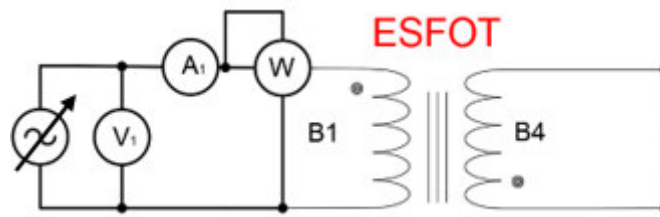
De manera análoga al criterio aplicado en la sección de prueba de circuito abierto se determina los parámetros en cortocircuito del transformador trifásico.

Con la prueba de cortocircuito se puede calcular las pérdidas en el cobre; ya que, el devanado al estar arrollado con alambre de cobre esmaltado genera una resistencia que al circular una corriente se generan las pérdidas por efecto Joule en los devanados.

Para realizar la prueba de cortocircuito es necesario disponer de una fuente de voltaje variable, donde, al aumentar progresivamente el voltaje desde el valor mínimo, se mide la corriente de cortocircuito asegurándose que dicha corriente no sobrepase a la corriente nominal.

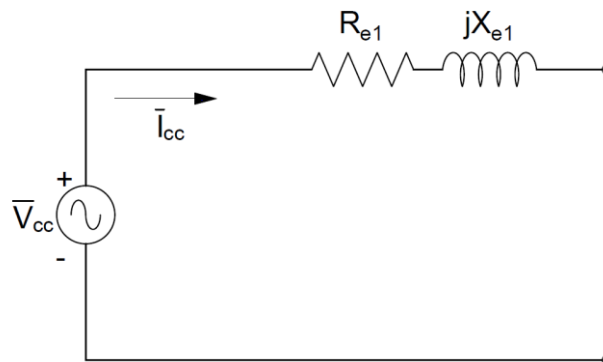
También, esta prueba es recomendable realizarla en el lado de alto voltaje cortocircuitando el lado de bajo voltaje; pero, cuando la relación de transformación es de 1:1 esta prueba se realiza indistintamente en cualquiera de los dos lados, para este caso se trabaja en el lado primario cortocircuitando el lado secundario.

El diagrama esquemático para realizar esta prueba se lo muestra en la Figura 3.12.



**Figura 3.12** Ensayo de cortocircuito monofásico.

Como el voltaje aplicado para la prueba de cortocircuito es una parte pequeña en referencia al voltaje nominal, las pérdidas en el núcleo son tan pequeñas que se consideran despreciables, por lo tanto, toda la potencia absorbida se debe a las pérdidas en los bobinados primario y secundario del transformador [7]. En la Figura 3.13 se exhibe el circuito equivalente aproximado observado desde el lado primario con el transformador sometido a la prueba de cortocircuito.



**Figura 3.13** Circuito equivalente aproximado en condiciones de cortocircuito.

En base a la Figura 3.13 se procede a calcular la resistencia y la reactancia equivalente, mediante la aplicación de las siguientes fórmulas.

$$R_{e1} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2}$$

**Ecuación 3.10** Resistencia equivalente observada desde el lado primario.

$$Z_{e1} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}}$$

**Ecuación 3.11** Impedancia equivalente observada desde el lado primario.

$$X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2}$$

**Ecuación 3.12** Reactancia equivalente observada desde el lado primario.

Donde:

$R_{e1}$  : ( $\Omega$ ) Resistencia equivalente observada desde el lado primario

$P_{cc}$  : (W) Potencia de cortocircuito

$I_{cc}$  : (A) Corriente de cortocircuito

$V_{cc}$  : (V) Voltaje de cortocircuito

$Z_{e1}$  : ( $\Omega$ ) Impedancia equivalente observada desde el lado primario

$X_{e1}$  : ( $\Omega$ ) Reactancia equivalente observada desde el lado primario

Para obtener el circuito equivalente exacto, se aplica el criterio de diseño óptimo; el cual, considera que la pérdida de potencia en el devanado primario es igual a la que ocurre en el devanado secundario, de donde, se desprenden las siguientes ecuaciones:

$$R_1 = 0.5R_{e1}$$

**Ecuación 3.13** Resistencia bobinado primario.

$$R_2 = \frac{0.5R_{e1}}{a^2}$$

**Ecuación 3.14** Resistencia bobinado secundario.

$$X_1 = 0.5X_{e1}$$

**Ecuación 3.15** Reactancia bobinado primario.

$$X_2 = \frac{0.5X_{e1}}{a^2}$$

**Ecuación 3.16** Reactancia bobinado secundario.

### **Conexiones de los Transformadores**

Las conexiones de los transformadores están clasificadas y normalizadas según la norma VDE, Siglas de la Federación Alemana de Industrias Electrotécnicas, Electrónicas y de Tecnología de la Información.

Los grupos de conexiones sirven para determinar el parentesco y la compatibilidad entre transformadores y así poder conectarlos en paralelo.

Entre las conexiones que se realizan en el presente proyecto se resaltan: Conexión Delta-Delta, Conexión Estrella-Estrella, Conexión Delta-Estrella y Conexión Estrella-Delta.

### Conexión Delta-Delta

Esta conexión es una de las típicas a nivel práctico ya que se las utiliza con cargas equilibradas y es conectado en baja tensión.

El diagrama de conexión se presenta en la Figura 3.14.

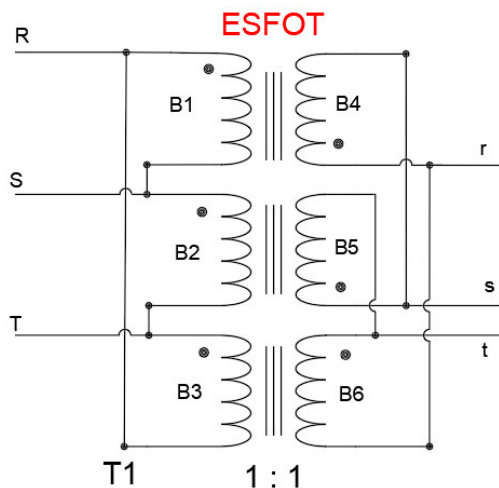


Figura 3.14 Conexión Δ-Δ.

### Conexión Estrella-Estrella

Esta conexión no se utiliza mucho a nivel práctico ya que la forma de conexión puede ocasionar terceros armónicos, que afectan directamente a la carga.

El diagrama de conexión se presenta en la Figura 3.15.

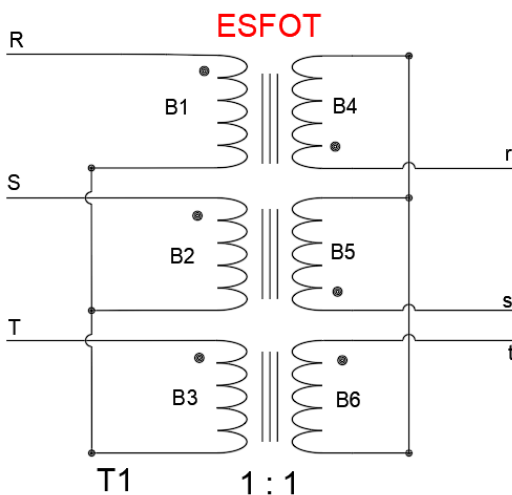


Figura 3.15 Conexión Y-Y.



### Conexión Delta-Estrella

En el caso de transformadores de distribución este tipo de conexiones son de las más utilizadas, debido a que se puede acoplar cargas monofásicas y trifásicas. Se aplica en redes de alta tensión.

El diagrama de conexión se presenta en la Figura 3.16.

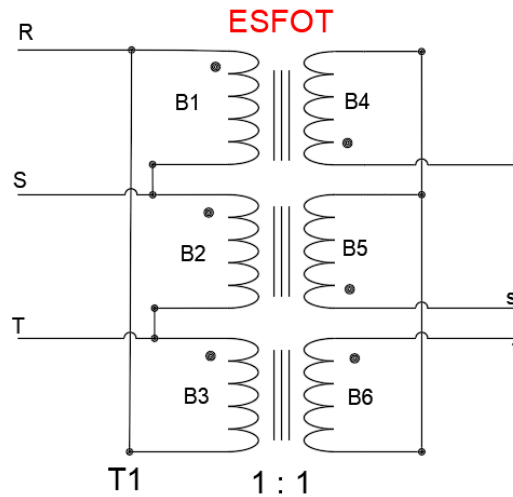


Figura 3.16 Conexión Δ-Y.

### Conexión Estrella-Delta

Este tipo de conexiones es usual en sistemas de alto voltaje, ya que en esta conexión no se presentan los problemas de armónicos gracias a la conexión en Delta del secundario.

El diagrama de conexión se presenta en la Figura 3.17.

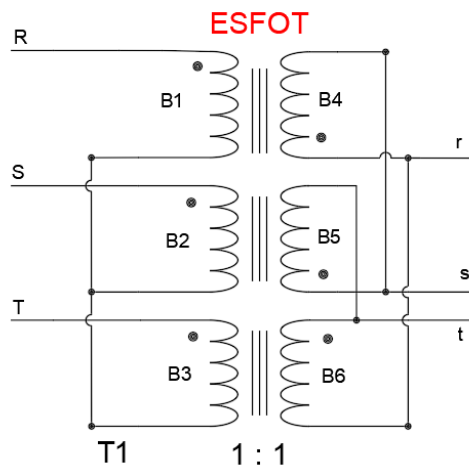


Figura 3.17 Conexión Y-Δ.

### Grupo de conexiones de transformadores trifásicos

Los transformadores trifásicos se encuentran clasificados de acuerdo al grupo de conexión al que pertenecen.

Grupo A : Dd0, Yy0 y Dz0

Grupo B : Dd6, Yy6 y Dz6

Grupo C : Dy5, Yd5 y Yz5

Grupo D : Dy11, Yd11 y Yz11

A cada grupo se le asigna un número el cual multiplicado por  $30^\circ$  obtiene el desfase del secundario con respecto al primario [8].

Ejemplo:

La conexión de tipo Dy5, perteneciente al grupo C se analiza de la siguiente manera:

D → Conexión del primario en Delta

Y → Conexión del secundario en Estrella

5 →  $5 \times 30^\circ = 150^\circ$  Desfase secundario respecto a primario

El diagrama de conexión se presenta en la Figura 3.18

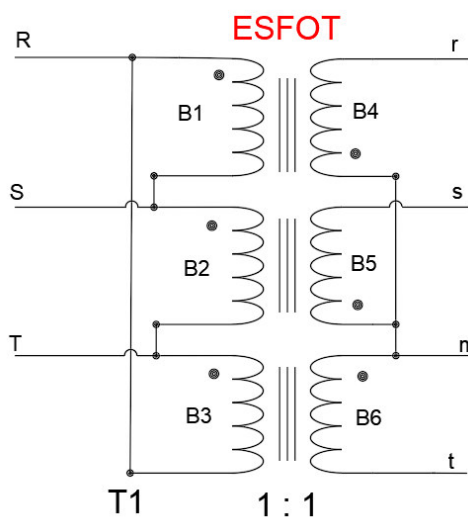


Figura 3.18 Conexión Dy5.

## 3.2 Cálculo del Transformador Trifásico

En esta sección se establecen los requerimientos del transformador y los cálculos para dimensionar cada componente que será implementado en cada módulo didáctico.

## Requerimientos, potencia y voltaje de alimentación

Para la implementación del módulo didáctico de transformadores para aplicaciones trifásicas se analizó la carga que estará conectada al transformador, para ello se consideraron motores trifásicos de hasta 3/4 (HP) y cargas resistivas de baja potencia comúnmente usadas en los laboratorios de la ESFOT, donde, se estableció la potencia aparente de 1.9 (KVA). El voltaje de alimentación se realiza a una red trifásica de 220 (V) a 60 (Hz).

La Tabla 3.1 presenta los datos iniciales que se conocen para el dimensionamiento del transformador.

**Tabla 3.1** Datos iniciales para el dimensionamiento.

Datos Requeridos	
Tensión que se va a conectar	$V_1 = 220$ (V)
Tensión secundaria que se precisa	$V_2 = 220$ (V)
Potencia que tiene que suministrar	$S_2 = 1900$ (VA)
Frecuencia a la que se va a trabajar	$F = 60$ (Hz)
Relación	1:1

## Sección del núcleo

Para calcular la sección del núcleo se utiliza la Ecuación 3.17.

$$S_n = k \sqrt{S_2}$$

**Ecuación 3.17** Fórmula sección del núcleo [1].

Donde:

- $S_n$  : (cm<sup>2</sup>) Sección del núcleo del transformador
- $S_2$  : 1900 (VA) Potencia aparente en el secundario
- $k$  : 0.9 Coeficiente dependiente del material

La determinación del coeficiente  $k$ , está dada entre el rango de 0.8 a 1.2, donde 0.8 si el material es de mayor calidad y 1.2 si el material es de menor calidad. Para el cálculo del transformador se optó por 0.9 como factor  $k$  [9].

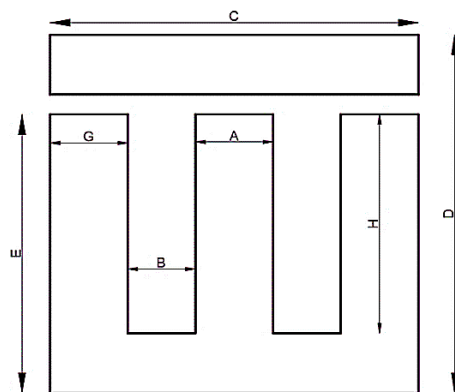
Aplicando la Ecuación 3.17 se obtiene:

$$S_n = 39.2 \text{ (cm}^2\text{)}$$

La sección del núcleo del transformador se lo puede aproximar a 39 (cm<sup>2</sup>) con el fin de facilitar los cálculos posteriores.

### Selección de la chapa magnética

Una vez conocido la sección del núcleo del transformador, se decide las dimensiones necesarias para las chapas magnéticas guiándose en la Figura 3.19 y con ayuda de las dimensiones recomendadas para la chapa trifásica de la Tabla 3.2.



**Figura 3.19** Dimensiones de las chapas magnéticas.

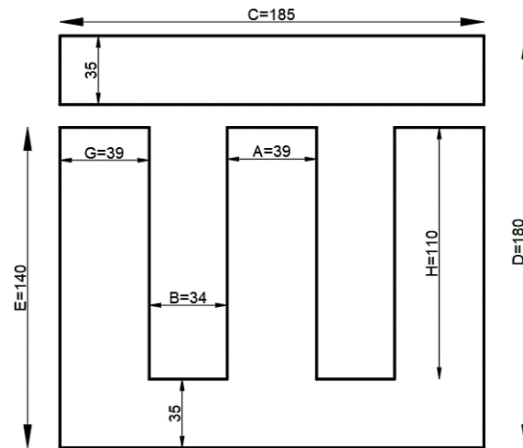
**Tabla 3.2** Dimensiones para chapas magnéticas en milímetros (mm) [1].

RC	A	B	C	D	E	F	G	H
RC40	40	40	200	180	140	11	40	100
RC50	50	50	250	225	175	11	50	125
RC60	60	60	300	270	210	13	60	150
RC70	70	70	350	315	245	13	70	175
RC80	80	80	400	360	280	15	80	200
RC30A	30	30	150	150	120	8	30	90
RC40A	40	40	200	200	160	11	40	120
RC50A	50	50	250	250	200	11	50	150
RC60A	60	60	300	300	180	13	60	180
RC70A	70	70	350	350	210	13	70	210
RC80A	80	80	400	400	240	15	80	240

En la Tabla 3.2 se observa las dimensiones recomendadas para la construcción de la chapa magnética, y se selecciona RC40 debido a que la sección B en la Figura 3.19 es la adecuada para el espacio entre las bobinas. Sin embargo, se optó por reducir ciertas

medidas observadas en la tabla, con el fin de no desperdiciar el material y optimizar los costos.

Se realizó un estudio de mercado para definir el valor de la sección A, sin embargo, debido a la complejidad de encontrar chapas trifásicas, se adaptaron chapas monofásicas, y se concluyó el valor de A en 39 (mm) como se muestra en el plano esquemático de la Figura 3.20.



**Figura 3.20** Dimensiones establecidas de las chapas magnéticas.

### Carrete de plástico

El carrete está construido por planchas de plástico por su excelente propiedad de aislante eléctrico [10].

Como el valor de A es igual a 39 (mm) y la sección del núcleo  $S_n$  se aproxima a 3900 ( $\text{mm}^2$ ) se aplica la ecuación del área en un rectángulo, y se determina las dimensiones del carrete de plástico necesario para introducir las chapas magnéticas.

$$S_n = A * h$$

### Ecuación 3.18 Ecuación del área en un rectángulo.

Donde:

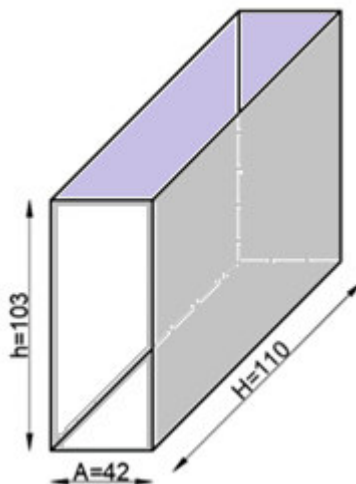
A : 39 (mm) Ancho del núcleo

h : (mm) Altura del núcleo o empilado de las chapas

Operando en la Ecuación 3.18 se obtiene:

$$h = 100 \text{ (mm)}$$

Con el fin de colocar las chapas al carrete de plástico sin problemas se opta por realizar un juego en sus medidas considerando el espesor de la plancha de plástico, las medidas externas del carrete se muestra en la Figura 3.21.



**Figura 3.21** Dimensiones carrete de plástico.

### Flujo magnético

El cálculo del flujo magnético se la realiza aplicando la Ecuación 3.19:

$$\phi = B * S_n$$

**Ecuación 3.19** Flujo magnético [1].

Donde:

$\phi$  : (Maxwell) Flujo magnético

B : 10000 (Gauss) Inducción magnética

El valor de la inducción magnética está comprendido entre los valores de 8000 y 14000 (Gauss), por consiguiente, para el cálculo y diseño del transformador se optó por el valor de 10000 (Gauss) como valor recomendado [11].

Utilizando la Ecuación 3.19 se obtiene:

$$\phi = 390000 \text{ (Maxwell)}$$

### Potencia devanado primario

La potencia activa del devanado primario se la obtiene con la Ecuación 3.20. La potencia aparente se considera como potencia activa con el fin de sobredimensionar el transformador como un factor de seguridad  $S_2 = P_2$  [1].

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta}$$

**Ecuación 3.20** Potencia en el devanado primario [1].

Donde:

- $P_1$  : (W) Potencia primaria
- $P_2$  : 1900 (W) Potencia secundaria
- $\eta$  : 0.9 Rendimiento

El rendimiento del transformador se considera del 90% por ser máquina estática.

Aplicando la Ecuación 3.20 se obtiene:

$$P_1 = 2111.1 \text{ (W)}$$

### **Intensidad del bobinado primario**

Para calcular la intensidad del bobinado primario se utiliza la Ecuación 3.21.

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} * V_1 * \cos \theta}$$

**Ecuación 3.21** Intensidad de corriente en bobinado primario [1].

Donde:

- $I_1$  : (A) Corriente de línea en el bobinado primario
- $V_1$  : 220 (V) Tensión de línea primaria
- $\cos \theta$  : 0.85 Factor de potencia

El factor de potencia está establecido en 0.85, ya que la empresa eléctrica menciona que todas las industrias donde se manejen cargas inductivas deben tener un factor de potencia de 0.8 en adelante.

Aplicando la Ecuación 3.21 se obtiene:

$$I_1 = 6.5 \text{ (A)}$$

### **Intensidad del devanado secundario**

Para calcular la intensidad del bobinado secundario se utiliza la Ecuación 3.22:

$$I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} * V_2 * \cos \theta}$$

**Ecuación 3.22** Intensidad de corriente en el bobinado secundario [1].

Donde:

$I_2$  : (A) Corriente de línea en el bobinado secundario

Aplicando la Ecuación 3.22 se obtiene:

$$I_2 = 5.86 \text{ (A)}$$

### **Potencia de pérdida en el transformador**

La potencia pérdida es por parte de los tres devanados.

$$P_p = \frac{P_1}{100}$$

**Ecuación 3.23** Cálculo de la potencia pérdida [1].

Donde:

$P_1$  : 2111.1 (W) Potencia primaria

$P_p$  : (W) Potencia pérdida

El valor constante de 100 se ha establecido en base a ensayos y experiencia en la construcción de transformadores [1]. Aplicando la Ecuación 3.23 se obtiene:

$$P_p = 21.1 \text{ (W)}$$

### **Resistencia óhmica para bobinado primario**

$$r_1 = \frac{P_p}{3 * I_1^2}$$

**Ecuación 3.24** Cálculo de la resistencia del bobinado primario [1].

Donde:

$r_1$  : ( $\Omega$ ) Resistencia del bobinado primario

Utilizando la Ecuación 3.24 se tiene que:

$$r_1 = 0.17 \text{ ( $\Omega$ )}$$

### **Resistencia óhmica para bobinado secundario**

$$r_2 = \frac{P_p}{3 * I_2^2}$$

**Ecuación 3.25** Cálculo de la resistencia del bobinado secundario [1].



Donde:

$r_2$  : ( $\Omega$ ) Resistencia del bobinado secundario

Utilizando la Ecuación 3.25 se tiene que:

$$r_2 = 0.2 (\Omega)$$

### **Tensión de fase primaria en triángulo**

Se calcula la tensión de fase en triángulo, debido a que en esta configuración el voltaje de fase es máximo y es igual al voltaje de línea de la red.

$$E_{f1} = V_1 - r_1 * I_1$$

**Ecuación 3.26** Cálculo de la tensión de fase primaria [1].

Donde:

$E_{f1}$  : (V) Tensión de fase primaria

Aplicando la Ecuación 3.26 se tiene que:

$$E_{f1} = 218.9 (V)$$

### **Tensión de fase secundaria en triángulo**

En base al análisis anterior y considerando que la relación de transformación es 1:1 se calcula la tensión de fase secundaria con la Ecuación 3.27.

$$E_{f2} = V_2 + r_2 * I_2$$

**Ecuación 3.27** Cálculo de la tensión de fase secundaria [1].

Donde:

$E_{f2}$  : (V) Tensión de fase secundaria

Aplicando la Ecuación 3.27 se tiene que:

$$E_{f2} = 221.2 (V)$$

### **Número de espiras del bobinado primario**

El número de espiras se calcula con la Ecuación 3.28:

$$N_1 = \frac{E_{f1} * 10^8}{4.44 * \phi * f}$$

**Ecuación 3.28** Número de espiras en el bobinado primario [11].

Donde:

$N_1$  : Número de vueltas primario

$f$  : 60 (Hz) Frecuencia

$10^8$  : Constante

4.44 : Constante

Aplicando la Ecuación 3.28 se obtiene:

$$N_1 = 210.7 \approx 211 \text{ (espiras)}$$

### **Número de espiras del bobinado secundario**

Se obtiene de las relaciones de tensiones de fase y número de vueltas.

$$N_2 = \frac{N_1 * E_{f2}}{E_{f1}}$$

**Ecuación 3.29** Número de espiras en el bobinado secundario [1].

Donde:

$N_2$  : Número de vueltas secundario

Aplicando la Ecuación 3.29 se obtiene:

$$N_2 = 213.2 \approx 213 \text{ (espiras)}$$

### **Sección del hilo del bobinado primario**

La sección del hilo primario se calcula con la Ecuación 3.30.

$$S_p = \frac{I_1}{J_1}$$

**Ecuación 3.30** Sección del conductor en el bobinado primario [1].

Donde:

$S_p$  : ( $\text{mm}^2$ ) Sección del conductor primario

$J_1$  : 4 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ) Densidad de corriente

La densidad de corriente se la puede considerar entre los valores de 2 y 6.5 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ) por consiguiente, es recomendable tomar el valor de 4 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ) para el bobinado primario y secundario [1].

Usando la Ecuación 3.30 se obtiene:

$$S_p = 1.625 \text{ (mm}^2\text{)}$$

### Sección del hilo del bobinado secundario

Se calcula de forma similar al primario, pero usando la intensidad del devanado secundario  $I_2$ .

$$S_S = \frac{I_2}{J_2}$$

**Ecuación 3.31** Sección del conductor en el bobinado secundario [1]

Donde:

$S_S$  : (mm<sup>2</sup>) Sección del conductor secundario

Usando la Ecuación 3.31 se obtiene:

$$S_S = 1.46 \text{ (mm}^2\text{)}$$

### Diámetro del conductor primario

Una vez conocido la sección del hilo, el diámetro del conductor se lo calcula con la Ecuación 3.32, donde el factor 0.785 se lo considera constante.

$$\phi_1 = \sqrt{\frac{S_P}{0.785}}$$

**Ecuación 3.32** Diámetro del conductor primario [1].

Donde:

$\phi_1$  : (mm) Diámetro del alambre primario

Usando la Ecuación 3.32 se obtiene:

$$\phi_1 = 1.44 \text{ (mm)}$$

### Diámetro del conductor secundario

De forma semejante al diámetro del conductor primario, éste se obtiene mediante la aplicación de la Ecuación 3.33.

$$\phi_2 = \sqrt{\frac{S_S}{0.785}}$$

**Ecuación 3.33** Diámetro del conductor secundario [1].

Donde:

$\phi_2$  : (mm) Diámetro del alambre secundario

Utilizando la Ecuación 3.33 se tiene que,

$$\phi_2 = 1.36 \text{ (mm)}$$

### Elección del conductor

Con los datos obtenidos en los cálculos realizados de: corriente, sección del conductor y diámetro del conductor, se realiza el análisis para la elección del conductor adecuado para el transformador, tanto como para el bobinado primario como para el secundario, para esto se observa la Tabla 3.3. Donde, se muestra los calibres de los conductores con características determinadas.

**Tabla 3.3** Características de los conductores para transformadores [11].

Características de los conductores para transformadores						
AWG	Diámetro (mm)	Sección (mm) <sup>2</sup>	Nº Espiras	Kg/km	Resistencia (Ω/km)	Capacidad (A)
0000	11.86	107,2	--	--	0,158	319
000	10.40	85,3	--	--	0,197	240
00	9.226	67,43	--	--	0,252	190
0	8.252	53,48	--	--	0,317	150
1	7.348	42,41		375	0,40	120
2	6.544	33,63	--	295	0,50	96
3	5.827	26,67	--	237	0,63	78
4	5,189	21,15	--	188	0,80	60
5	4,621	16,77	--	149	1,01	48
6	4,115	13,30	--	118	1,27	38
7	3,665	10,55	--	94	1,70	30
8	3,264	8,36	--	74	2,03	24
9	2,906	6,63	--	58,9	2,56	19
10	2,588	5,26	--	46,8	3,23	15
11	2,305	4,17	--	32,1	4,07	12
12	2,053	3,31	--	29,4	5,13	9,5
13	1,828	2,63	--	23,3	6,49	7,5
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6,0
15	1,450	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2

En la Tabla 3.3 se observa que el calibre seleccionado para el transformador es el número 15 que cumple de manera aproximada con los datos requeridos del conductor.

### 3.3 Implementación del Transformador Trifásico

En esta sección se presenta de forma detallada la cantidad de material necesaria para la construcción de cada componente del módulo didáctico, además, se menciona el proceso de construcción del módulo.

En la Tabla 3.4 se muestra la cantidad aproximada de material para la construcción de un módulo. Los costos de los materiales de los cuatro módulos se encuentran detallados en el Anexo 3.

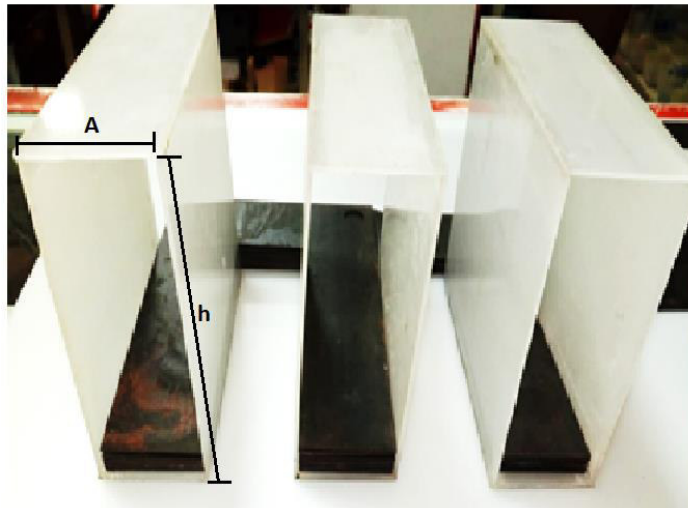
**Tabla 3.4** Cantidad de material por módulo.

Material	Cantidad
Chapas magnéticas	23 (lb)
Alambre de cobre #15	8 (lb)
Planchas de plástico	1 plancha
Papel aislante	1 (m)
Tornillo sin fin	4 tornillos sin fin
Tuerca 15 (mm)	8 tuercas
Tornillos tuercas y arandelas de 7 (mm)	12 pares
Ángulos de hierro	1 (m)
Borneras del módulo	12 unidades
Plancha de tool 0.9 (mm)	1/2 plancha
Aislante termo encogible	1(m)
Taype	1 unidad
Cable flexible #12	5 (m)
Porta fusibles y fusibles	6 unidades
Barniz	1/8 (Lt)
Pega PVC	1/16 (Lt)

#### Construcción del carrete

Con los ajustes considerados en la sección de cálculos, se realiza la construcción del carrete, donde,  $A = 42$  (mm) y  $h = 103$  (mm), medidas exteriores del carrete. El material seleccionado es el plástico por su propiedad aislante y la facilidad en la manipulación.

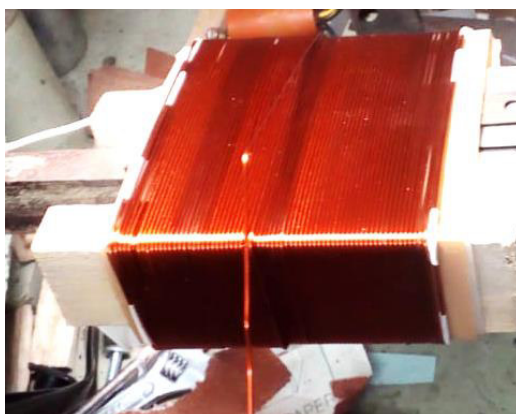
Se realiza el corte de la plancha de plástico considerando la medida de la chapa magnética para obtener mayor precisión y se procede al armado del carrete para cada una de las tres columnas según se aprecia en la Figura 3.22.



**Figura 3.22** Carrete de plástico y dimensiones.

### **Construcción de las bobinas**

Para el proceso de bobinado se adapta el carrete a la máquina giratoria, donde, también se adecúa un molde de madera en la parte interna del carrete para evitar que éste se deforme debido a la presión, como se muestra en la Figura 3.23 [12].



**Figura 3.23** Proceso de bobinado.

El alambre esmaltado que se utiliza es el AWG 15. Se realizan 211 vueltas para el devanado primario y 213 vueltas para el devanado secundario, los bobinados están debidamente aislados con papel prespan y para los terminales se utiliza el material aislante de plástico (espagueti) como se aprecia en la Figura 3.24.

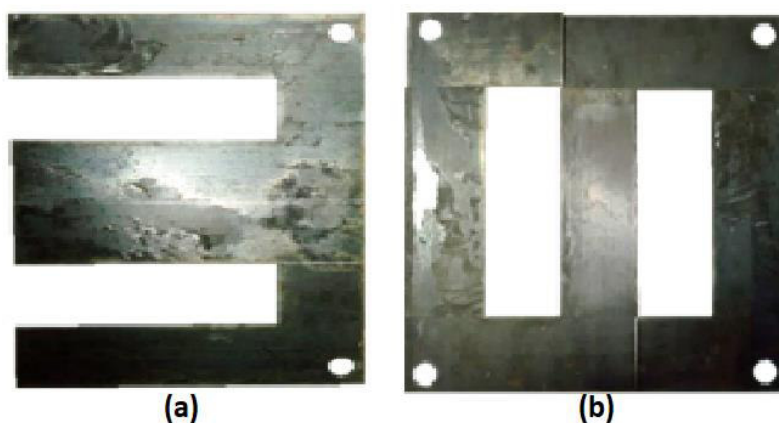


**Figura 3.24** Devanado completo de una columna correctamente aislada.

Este proceso se repite para las tres columnas del transformador trifásico.

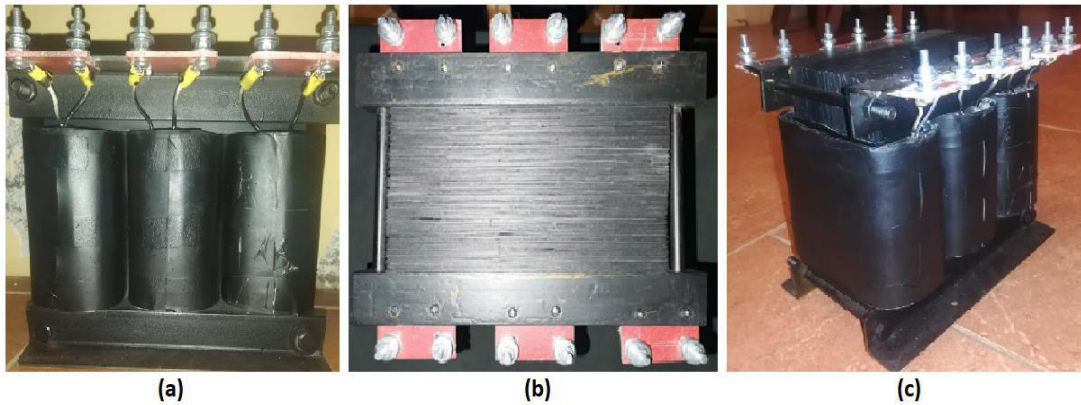
### **Armado del núcleo magnético**

Considerando la no disponibilidad de las chapas trifásicas en el mercado nacional, se procede con la adecuación de las chapas monofásicas para obtener chapas trifásicas como se observa en la Figura 3.25.



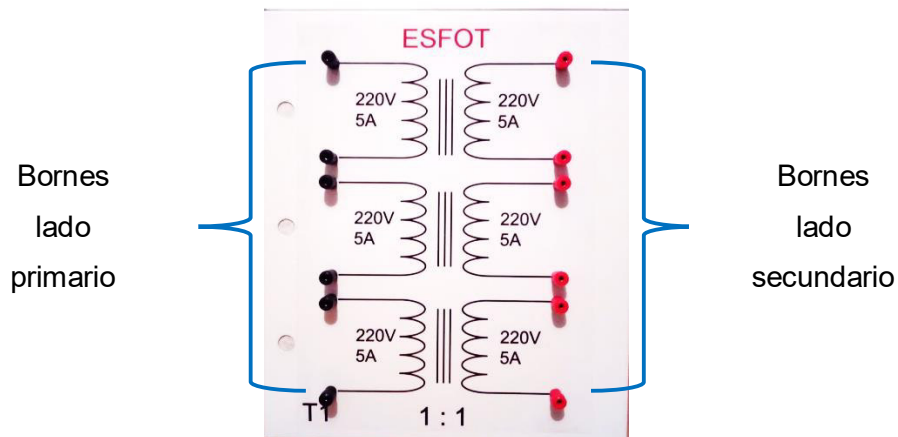
**Figura 3.25** (a) Chapa monofásica. (b) Chapa trifásica obtenida.

A continuación, se realiza el armado del núcleo considerando la combinación de las chapas. El núcleo terminado se muestra en la Figura 3.26. Para brindar mayor protección al transformador contra factores ambientales como el polvo y la humedad, se aporta un recubrimiento de pintura (barniz) al final del proceso.



**Figura 3.26** Núcleo armado. (a) Vista frontal. (b) Vista superior. (c) Vista isométrica.

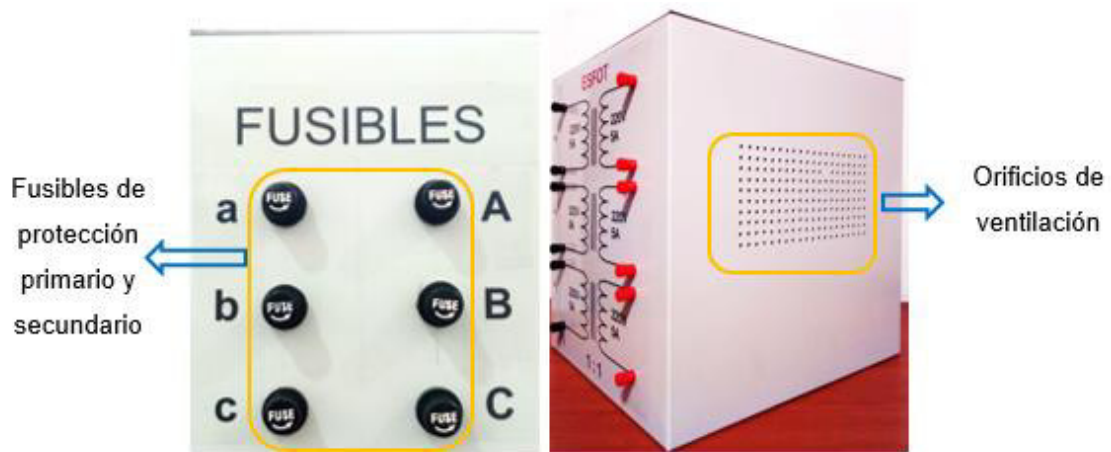
Finalmente, el transformador es colocado dentro de una caja metálica de dimensiones 30 cm de ancho, 35 cm de alto y 35 cm de fondo. En la parte frontal se encuentran los bornes para las conexiones de los devanados primarios y secundarios según se muestra en la Figura 3.27.



**Figura 3.27** Borneras de conexión.

Para evitar posibles recalentamientos del equipo al momento de su operación se realizan orificios de ventilación a los costados de la caja. En la parte posterior se conectan fusibles de protección de 5 (A) para cada una de las bobinas como se observa en la Figura 3.28. Los cálculos de las corrientes en los devanados fueron de aproximadamente 6 (A), sin embargo, se dimensiona fusibles de 5 (A) para proporcionar un factor de seguridad al transformador.





**Figura 3.28** Componentes de protección para el transformador.

El proceso anterior se realiza para los cuatro transformadores. Para una adecuada estadía en el laboratorio, los módulos son colocados en una estantería de estructura metálica con bases de madera donde estarán situadas las cajas como se observa en la Figura 3.29.



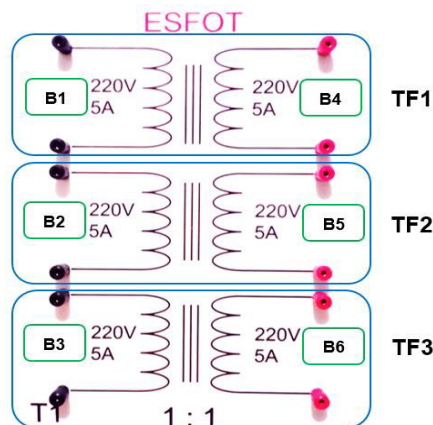
**Figura 3.29** Estante de transformadores trifásicos.

### 3.4 Pruebas y Análisis de Resultados

En esta sección se detallan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el transformador, entre las diferentes pruebas se destacan las pruebas de circuito abierto y cortocircuito para determinar los parámetros del transformador, así mismo se explica las conexiones trifásicas posibles en el módulo.

Los instrumentos que se utilizaron para la medida de cada parámetro fueron dos multímetros: uno marca DT-830D y otra marca MASTEC, además, un analizador de energía marca PEACE FAIR PZEM-022 y una pinza amperimétrica SEDCO MS2000G CLAMP METER.

Para realizar las pruebas al transformador trifásico de forma factible se considera que este está compuesto de tres transformadores monofásicos nombrados como TF1, TF2 y TF3 que contienen sus respectivos grupos de bobinas B1-B4, B2-B5 y B3-B6 como se muestra en la Figura 3.30.



**Figura 3.30** Designación de transformadores monofásicos.

#### Características del transformador

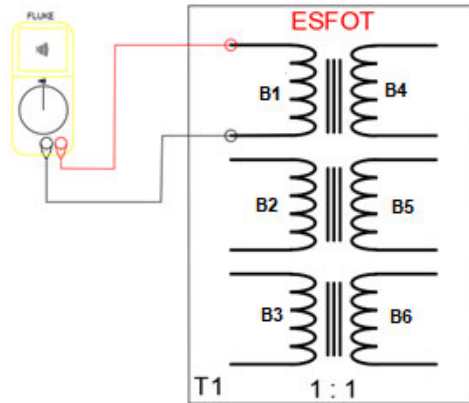
Las características del transformador trifásico se presentan en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5** Características del transformador.

Características del transformador trifásico	
Potencia aparente	1900 (KVA)
Voltaje nominal por bobina	220 (V)
Corriente nominal por bobina	5 (A)
Frecuencia	60 (Hz)
Relación de transformación	1:1

## Prueba de continuidad

La prueba de continuidad se la realiza a cada bobinado del transformador y sirve para conocer el buen estado de los conductores, en la Figura 3.31 se muestra el diagrama esquemático de la prueba de continuidad.



**Figura 3.31** Diagrama esquemático para la prueba de continuidad.

Esta prueba se realiza con la ayuda de un multímetro que emite un pitido que indica el buen estado del elemento como se muestra en la Figura 3.32. El procedimiento se repite para cada una de las bobinas en los 4 módulos.



**Figura 3.32** Prueba de continuidad.

En la Tabla 3.6 se muestra los resultados de esta prueba en cada uno de los módulos, en donde, se establece si la continuidad es correcta o no.

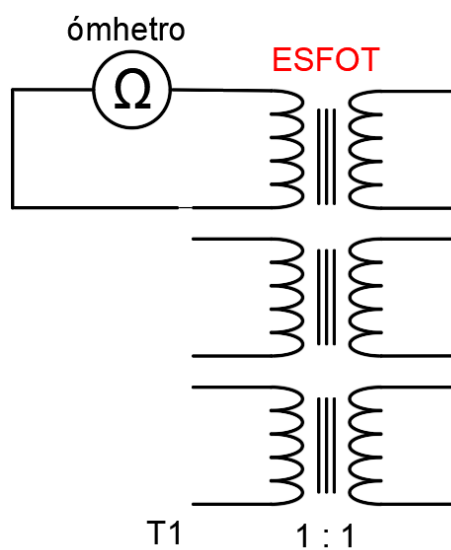
**Tabla 3.6** Resultados Prueba de Continuidad.

Módulos	Primario	Continuidad	Secundario	Continuidad
T1	B1	OK	B4	OK
	B2	OK	B5	OK
	B3	OK	B6	OK
T2	B1	OK	B4	OK
	B2	OK	B5	OK
	B3	OK	B6	OK
T3	B1	OK	B4	OK
	B2	OK	B5	OK
	B3	OK	B6	OK
T4	B1	OK	B4	OK
	B2	OK	B5	OK
	B3	OK	B6	OK

En base a la Tabla 3.6 cada una de las bobinas de los 4 módulos tiene continuidad y se encuentran en óptimas condiciones para entrar en funcionamiento.

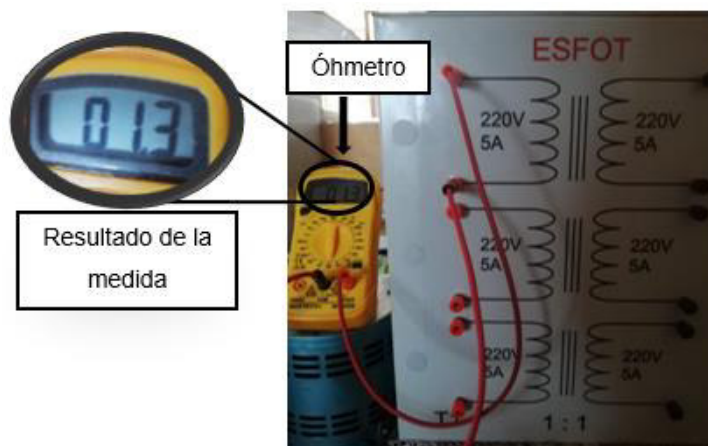
### Medición de resistencia en los devanados

Para realizar la medición se conecta el óhmetro a los terminales de cada devanado como se muestra en el diagrama esquemático de la Figura 3.33.



**Figura 3.33** Diagrama de conexión para medir resistencia.

En la Figura 3.34, se observa la medida obtenida en ohmios, el procedimiento se repite para cada una de las bobinas en los 4 módulos.



**Figura 3.34** Resistencia en el devanado.

En la Tabla 3.7 se muestra los valores medidos en cada uno de los módulos.

**Tabla 3.7** Valores de resistencia en los devanados.

Módulos	Resistencia devanado primario en ( $\Omega$ )		Resistencia devanado secundario en ( $\Omega$ )	
	T1	B1	1.3	B4
B2		1.2	B5	1.1
B3		1.3	B6	1.2
T2	B1	1.2	B4	1.1
	B2	1.2	B5	1.1
	B3	1.3	B6	1.2
T3	B1	1.2	B4	1.2
	B2	1.2	B5	1.1
	B3	1.2	B6	1.1
T4	B1	1.1	B4	1.2
	B2	1.1	B5	1.2
	B3	1.1	B6	1.2

Los valores de resistencia de los devanados primario y secundario son aproximadamente iguales. Esto es coherente considerando que el número de vueltas son similares. El valor promedio de resistencia de los devanados es 1.2 ( $\Omega$ ).

### Prueba de relación de transformación

Para verificar la relación de transformación del transformador se aplica un voltaje de 220 (V), ya que, es el voltaje nominal en los devanados. Esta medición se realizó en los respectivos transformadores TF1, TF2 y TF3 de cada módulo, donde, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8** Datos de la Prueba de Relación de Transformación.

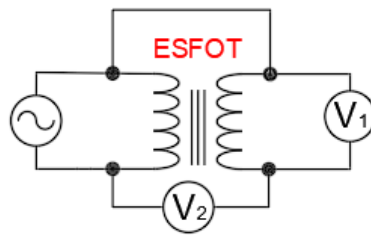
Módulo	Devanado Primario	Voltaje Primario (V)	Devanado secundario	Voltaje Secundario (V)	Relación $\frac{V_2}{V_1}$	% Error
T1	B1	223	B4	225	1.008	0.8 %
	B2	223	B5	223	1	0 %
	B3	224	B6	224	1	0 %
T2	B1	224	B4	225	1.004	0.4%
	B2	224	B5	226	1.008	0.8
	B3	225	B6	227	1.01	1 %
T3	B1	226	B4	226	1	0 %
	B2	225	B5	224	0.99	1 %
	B3	227	B6	229	1.008	0.8 %
T4	B1	224	B4	224	1	0 %
	B2	225	B5	226	1.004	0.4%
	B3	224	B6	227	1.013	1.3 %

El porcentaje de error esperado en la prueba de relación de transformación es del 0 %, sin embargo, en la Tabla 3.8 se visualiza un mínimo error que oscila alrededor del 0.7 %. Esto debido a que en el bobinado secundario se ha agregado dos vueltas más en relación al bobinado primario para compensar la caída de tensión en el transformador, también debido a las pequeñas variaciones de tensión de la red.

### Prueba de polaridad

La importancia de determinar la polaridad de las bobinas radica en saber dónde está ubicada la marca de polaridad, con el fin de realizar conexiones trifásicas.

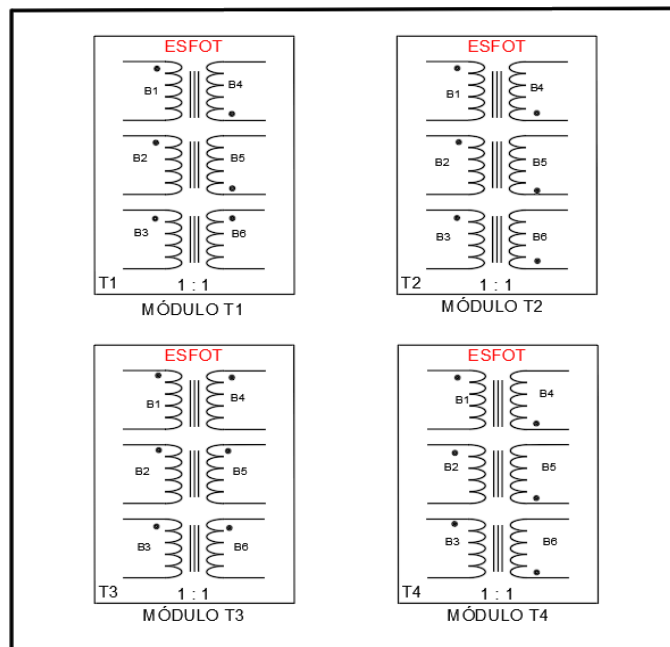
En el presente proyecto se tienen 6 bobinas en cada módulo y para determinar su polaridad se realiza la conexión de la Figura 3.35.



**Figura 3.35** Diagrama de conexión para obtener la polaridad.

Si el voltaje medido en  $V_2$  es mayor que el voltaje en  $V_1$  la polaridad es aditiva, si el voltaje medido en  $V_2$  es menor que el voltaje en  $V_1$  la polaridad es sustractiva.

En la Figura 3.36 se muestra las marcas de polaridad de los cuatro módulos.

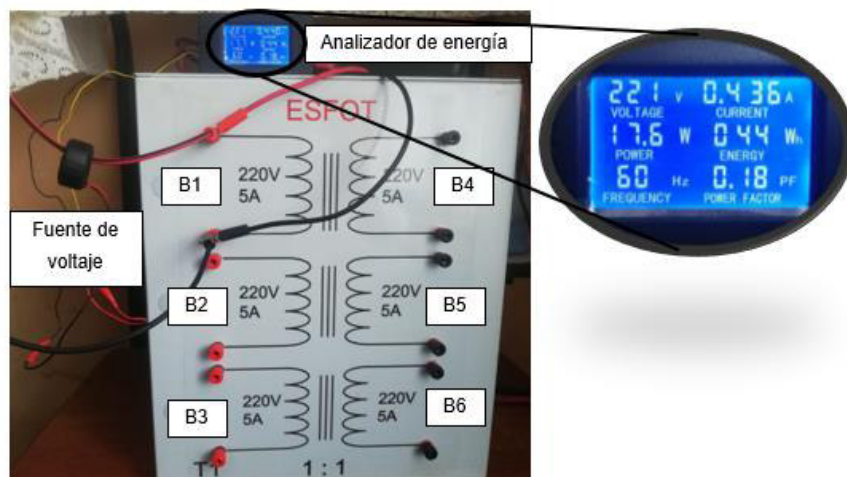


**Figura 3.36** Marcas de polaridad.

### Prueba de circuito abierto

La prueba de circuito abierto o de vacío se realiza con el fin de determinar las pérdidas en el hierro, esta prueba consiste en dejar el lado secundario en circuito abierto.

Debido a la dificultad para encontrar instrumentos adecuados para realizar esta prueba de forma trifásica se la realizó de manera monofásica en los tres transformadores monofásicos TF1, TF2 y TF3 del módulo T1. Al ser un transformador de relación 1:1 se considera cualquier lado como el lado primario; entonces, el lado B1 va conectado a la fuente de voltaje con su tensión nominal 220 (V) y el lado B4 está en circuito abierto, como se muestra en la Figura 3.37.



**Figura 3.37** Prueba de circuito abierto.

Se utilizó un analizador de energía PEACE FAIR PZEM-022 que indica el voltaje, la corriente, la potencia consumida y el factor de potencia, datos que se presentan en la Tabla 3.9. Esta prueba se la realizó a cada módulo implementado y en el Anexo 2 se encuentran detallados los resultados de todos los módulos.

**Tabla 3.9** Datos de la prueba de circuito abierto módulo T1.

Módulo T1	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Factor de potencia
TF1	221	0.436	17.6	0.18
TF2	222	0.581	14.4	0.11
TF3	221	0.400	18.7	0.20

Para determinar las pérdidas en el hierro con respecto a la prueba de circuito abierto en el transformador monofásico TF1, se aplica la Ecuación 3.34:

$$\% \text{Pérdidas Fe} = \frac{\text{potencia circuito abierto}}{\text{potencia de entrada}} * 100\%$$

**Ecuación 3.34** Porcentaje de pérdidas en el hierro.

La potencia de circuito abierto muestra el analizador de energía 17.6 (W), y la potencia de entrada es la potencia activa monofásica del transformador TF1 del módulo T1.

$$P = V * I * \cos \theta$$

**Ecuación 3.35** Potencia activa monofásica del transformador TF1.



Donde:

P : (W) Potencia activa del transformador TF1

V : 220 (V) Voltaje nominal

I : 5 (A) Intensidad nominal

$\cos \theta$  : 0.85 Factor de potencia

El factor de potencia está regulado en 0.85, efectuando la operación:

$$P = 935 \text{ (W)}$$

Por lo tanto, el porcentaje de pérdidas en el hierro del transformador TF1 del módulo T1 de acuerdo a la Ecuación 3.34 es:

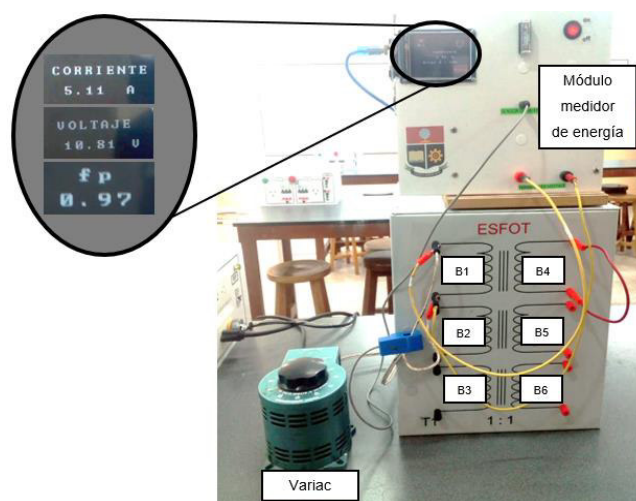
$$\% \text{Pérdidas Fe} = 1.88 \text{ (\%)}$$

### Prueba de cortocircuito

El objetivo de esta prueba es determinar las pérdidas que se generan en el cobre; es decir, en los devanados del transformador.

Esta prueba se realiza en el módulo T1 en el grupo de bobinas TF1, TF2 Y TF3. Considerando que la relación de transformación es de 1:1 la prueba se puede realizar en cualquiera de los dos lados, para este caso la fuente de voltaje variable (Variac) se conecta a la bobina B1 y se cortocircuita la bobina B4 según se muestra en la Figura 3.38.

El voltaje aplicado se va aumentando paulatinamente hasta obtener la corriente nominal en cada devanado; luego, se procede a tomar los valores de voltaje, corriente y factor de potencia para calcular la potencia perdida en el cobre.



**Figura 3.38** Prueba de cortocircuito.

Los datos obtenidos en la prueba de cortocircuito en el módulo T1 se muestran en la Tabla 3.10. Esta prueba se la realizó a cada módulo implementado y en el Anexo 2 se encuentran detallados los resultados de todos los módulos.

**Tabla 3.10** Datos de la prueba de cortocircuito módulo T1.

Módulo T1	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Factor de potencia
TF1	10.81	5.11	53.58	0.97
TF2	10.90	4.75	50.22	0.97
TF3	10.67	4.87	50.40	0.97

Para la determinar el porcentaje de pérdida en el cobre mediante la prueba de cortocircuito en el transformador monofásico TF1, se aplica la Ecuación 3.36:

$$\%Pérdidas Cu = \frac{\text{potencia de cortocircuito}}{\text{potencia de entrada}} * 100\%$$

**Ecuación 3.36** Porcentaje de pérdida en el cobre.

La potencia de cortocircuito obtenido es 53.58 (W), y la potencia de entrada es la potencia activa monofásica del transformador TF1 del módulo T1 que corresponde al valor de 935 (W) que ya se calculó anteriormente en la prueba de circuito abierto.

Por lo tanto, el porcentaje de pérdidas en el cobre del transformador TF1 del módulo T1 de acuerdo a la Ecuación 3.36 es:

$$\%Pérdidas Cu = 5.73 (\%)$$

### Determinación de los parámetros

Con los datos obtenidos en la prueba de circuito abierto y corto circuito se procede a realizar los cálculos de los parámetros, donde, se elige el grupo monofásico TF1 del módulo T1.

**Tabla 3.11** Datos obtenidos en las pruebas de circuito abierto y cortocircuito.

Circuito abierto		Cortocircuito	
V <sub>ca</sub>	221 (V)	V <sub>cc</sub>	10.81 (V)
I <sub>ca</sub>	0.436 (A)	I <sub>cc</sub>	5.11 (A)
P <sub>ca</sub>	17.6 (W)	P <sub>cc</sub>	53.58 (W)
Fp	0.18	Fp	0.97

Las ecuaciones aplicadas, se encuentran especificadas en la sección 3.1.

La potencia aparente sin carga se obtiene mediante la aplicación de la Ecuación 3.6.

$$S_{ca} = V_{ca} * I_{ca}$$

$$S_{ca} = 96.35 \text{ (VA)}$$

La potencia reactiva sin carga se obtiene mediante la aplicación de la Ecuación 3.7.

$$Q_{ca} = \sqrt{S_{ca}^2 - P_{ca}^2}$$

$$Q_{ca} = 94.68 \text{ (VAR)}$$

La resistencia de pérdida en el núcleo se calcula mediante la aplicación de la Ecuación 3.8.

$$R_{C1} = \frac{V_{ca}^2}{P_{ca}}$$

$$R_{C1} = 2\,775 \text{ } (\Omega)$$

La reactancia de magnetización se obtiene mediante la aplicación de la Ecuación 3.9

$$X_{m1} = \frac{V_{ca}^2}{Q_{ca}}$$

$$X_{m1} = 515.85 \text{ } (\Omega)$$

La resistencia equivalente se calcula mediante la aplicación de la Ecuación 3.10.

$$R_{e1} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2}$$

$$R_{e1} = 2.05 \text{ } (\Omega)$$

La impedancia equivalente se calcula aplicando la Ecuación 3.11.

$$Z_{e1} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}}$$

$$Z_{e1} = 2.11 \text{ } (\Omega)$$

La reactancia equivalente se obtiene mediante la aplicación de la Ecuación 3.12.

$$X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2}$$

$$X_{e1} = 0.50 (\Omega)$$

La resistencia del bobinado primario se calcula aplicando de la Ecuación 3.13

$$R_1 = 0.5R_{e1}$$

$$R_1 = 1.025 (\Omega)$$

La resistencia del bobinado secundario se obtiene mediante la aplicación de la Ecuación 3.14.

$$R_2 = \frac{0.5R_{e1}}{a^2}$$

$$a = 1$$

$$R_2 = 1.025 (\Omega)$$

La reactancia del bobinado primario se calcula aplicando la Ecuación 3.15.

$$X_1 = 0.5X_{e1}$$

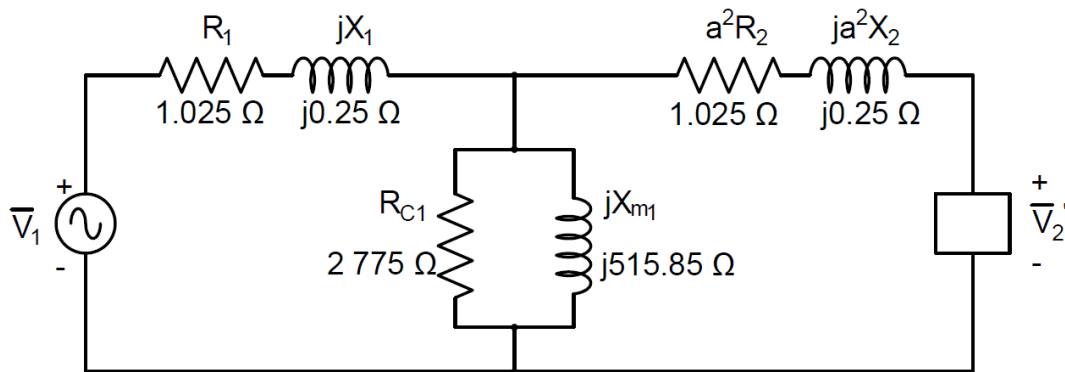
$$X_1 = 0.25 (\Omega)$$

La reactancia del bobinado secundario se calcula mediante la aplicación de la Ecuación 3.16.

$$X_2 = \frac{0.5X_{e1}}{a^2}$$

$$X_2 = 0.25 (\Omega)$$

El circuito equivalente exacto obtenido de los cálculos realizados se muestra en la Figura 3.39.



**Figura 3.39** Circuito equivalente exacto obtenido.

### Cálculo de la Eficiencia

Con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, se calcula la eficiencia del transformador TF1 del módulo T1, mediante la Ecuación 3.37.

$$\eta = \frac{P_S}{P_S + P_{Cu} + P_{Fe}} * 100\%$$

**Ecuación 3.37** Eficiencia del transformador [4].

Donde:

- $\eta$  : Eficiencia
- $P_S$  : 812.81 (W) Potencia de salida a carga nominal
- $P_{Cu}$  : 53.58 (W) Potencia pérdida en el cobre
- $P_{Fe}$  : 17.6 (W) Potencia pérdida en el hierro

Para obtener  $P_S$  se aplica la siguiente fórmula:

$$P_S = V_s * I_s * \cos\theta_s$$

**Ecuación 3.38** Potencia de salida a carga nominal [4].

Donde:

- $V_s$  : 211.12 (V) Voltaje de salida a carga nominal
- $I_s$  : 5 (A) Corriente de salida a carga nominal
- $\cos\theta_s$  : 0.77 Factor de potencia de salida a carga nominal

Los valores de  $V_s$ ,  $I_s$  y  $\cos\theta_s$  se obtuvieron con el transformador sometido a carga nominal. Entonces,

$$P_S = 812.81 \text{ (W)}$$

Aplicando la Ecuación 3.37 se tiene que la eficiencia es:

$$\eta = 91.95 \%$$

El valor de la eficiencia del 91.95 % corresponde al transformador TF1 del módulo T1, sin embargo, como los transformadores TF2 y TF3 del mismo módulo son de características idénticas se considera que tienen la misma eficiencia. A la vez que los cuatro módulos son semejantes, se tiene que esta eficiencia es aproximadamente igual para todos.

## Conexiones Trifásicas

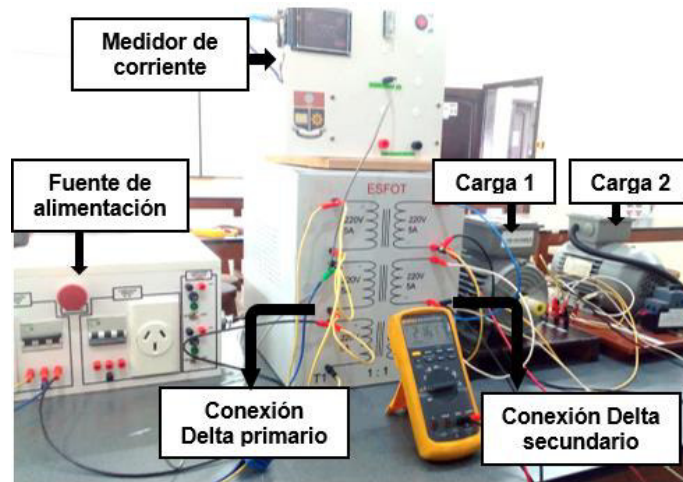
Las conexiones trifásicas realizadas y descritas en esta sección, están implementadas en el módulo T1. Los valores obtenidos se encuentran representados mediante tablas.

Las cargas que alimenta el transformador están dadas mediante pasos de carga: sin carga, con carga 1 y con carga 2. Las cargas utilizadas son dos motores trifásicos de inducción de 0.75 (HP).

### Conexión Delta-Delta ( $\Delta$ - $\Delta$ )

La conexión Delta-Delta se la ha realizado en el módulo T1 siguiendo el diagrama de conexión de la Figura 3.14 de la sección 3.1; en el cual, se han identificado los puntos de polaridad del módulo que ayudan a realizar la conexión Delta en el primario y Delta en el secundario como se observa en la Figura 3.40; además, los motores se encuentran conectado en la configuración Delta.

En la Figura 3.40 se observan los instrumentos de medida utilizados como el multímetro y el módulo medidor de corriente que sirven para medir el voltaje y la corriente de entrada y salida del transformador; además, se observa los motores utilizados como carga y la fuente de alimentación trifásica.



**Figura 3.40** Conexión Delta-Delta del módulo T1

Para verificar las corrientes que entran y salen del módulo se ha conectado los dos motores en paralelo. Los pasos de carga realizados son en vacío, con carga 1 y con carga 2 y los resultados obtenidos se observa en la Tabla 3.12.

**Tabla 3.12** Resultados de la conexión Delta-Delta.

Conexión Delta-Delta módulo T1									
Voltaje	Carga	Primario				Secundario			
		V <sub>L</sub> (V)		V <sub>F</sub> (V)		V <sub>L</sub> (V)		V <sub>F</sub> (V)	
Voltaje	Vacío	V <sub>RS</sub>	217	V <sub>RS</sub>	217	V <sub>RS</sub>	216	V <sub>RS</sub>	216
		V <sub>SR</sub>	218	V <sub>SR</sub>	218	V <sub>SR</sub>	217	V <sub>SR</sub>	217
		V <sub>RT</sub>	218	V <sub>RT</sub>	218	V <sub>RT</sub>	218	V <sub>RT</sub>	218
	Carga 1	V <sub>RS</sub>	217	V <sub>RS</sub>	217	V <sub>RS</sub>	217	V <sub>RS</sub>	217
		V <sub>SR</sub>	218	V <sub>SR</sub>	218	V <sub>SR</sub>	217	V <sub>SR</sub>	217
		V <sub>RT</sub>	217	V <sub>RT</sub>	217	V <sub>RT</sub>	217	V <sub>RT</sub>	218
	Carga 2	V <sub>RS</sub>	217	V <sub>RS</sub>	217	V <sub>RS</sub>	216	V <sub>RS</sub>	215
		V <sub>SR</sub>	217	V <sub>SR</sub>	217	V <sub>SR</sub>	215	V <sub>SR</sub>	215
		V <sub>RT</sub>	218	V <sub>RT</sub>	218	V <sub>RT</sub>	216	V <sub>RT</sub>	216
Corriente	Carga	Primario				Secundario			
		I <sub>L</sub> (A)		I <sub>F</sub> (A)		I <sub>L</sub> (A)		I <sub>F</sub> (A)	
Corriente	Vacío	I <sub>R</sub>	0.5	I <sub>RS</sub>	0.3	I <sub>R</sub>	0	I <sub>RS</sub>	0.1
		I <sub>S</sub>	0.6	I <sub>ST</sub>	0.4	I <sub>S</sub>	0	I <sub>ST</sub>	0.1
		I <sub>T</sub>	0.5	I <sub>RT</sub>	0.3	I <sub>T</sub>	0	I <sub>RT</sub>	0.1
	Carga 1	I <sub>R</sub>	2.1	I <sub>RS</sub>	1	I <sub>R</sub>	1.6	I <sub>RS</sub>	0.9
		I <sub>S</sub>	2.3	I <sub>ST</sub>	1.3	I <sub>S</sub>	1.7	I <sub>ST</sub>	1
		I <sub>T</sub>	2.3	I <sub>RT</sub>	1.3	I <sub>T</sub>	1.7	I <sub>RT</sub>	1
	Carga 2	I <sub>R</sub>	3.7	I <sub>RS</sub>	2	I <sub>R</sub>	3.1	I <sub>RS</sub>	1.8
		I <sub>S</sub>	4	I <sub>ST</sub>	2.3	I <sub>S</sub>	3.3	I <sub>ST</sub>	2
		I <sub>T</sub>	4	I <sub>RT</sub>	2.3	I <sub>T</sub>	3.4	I <sub>RT</sub>	2

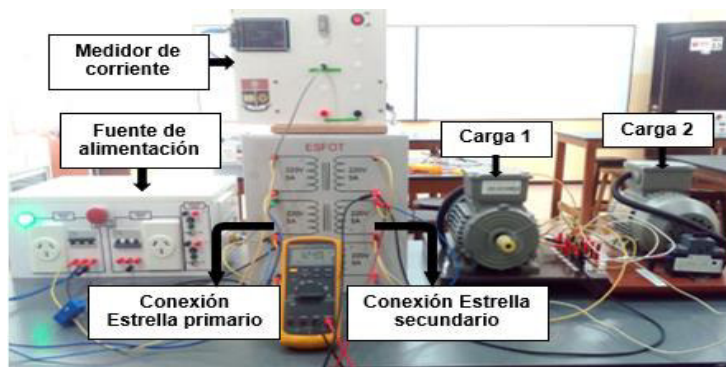
Los valores de corrientes y voltajes mostrados en la Tabla 3.12, corresponden a las mediciones en conexión Delta-Delta, en el cual los voltajes de fase son iguales a los voltajes de línea, y las corrientes de fase es igual a la corriente de línea entre  $\sqrt{3}$ .

Analizando la Tabla 3.12 se aprecia una leve caída de tensión a la salida cuando se aumenta la carga al transformador.

### Conexión Estrella-Estrella (Y-Y)

La conexión Estrella-Estrella se la ha realizado en el módulo T1 siguiendo el diagrama de conexión de la Figura 3.15 de la sección 3.1; en el cual, se ha identificado los puntos de polaridad del módulo que ayudan a realizar la conexión Estrella en el primario y Estrella en el secundario como se observa en la Figura 3.41.

En la Figura 3.41 se observa los elementos e instrumentos de medida que son utilizados en esta configuración.



**Figura 3.41** Conexión Estrella-Estrella del módulo T1

Para verificar las corrientes que entran y salen del módulo se ha conectado los dos motores en paralelo en la configuración Estrella. Los pasos de carga realizados son en vacío, con carga 1 y con carga 2 y los resultados obtenidos se observa en la Tabla 3.13.

**Tabla 3.13** Resultados de la conexión Estrella-Estrella.

Conexión Estrella-Estrella módulo T1									
	Carga	Primario				Secundario			
		$V_L$ (V)		$V_F$ (V)		$V_L$ (V)		$V_F$ (V)	
Voltaje	Vacío	$V_{RS}$	216	$V_{RN}$	125	$V_{RS}$	216	$V_{RN}$	125
		$V_{ST}$	218	$V_{SN}$	125	$V_{ST}$	217	$V_{SN}$	126
		$V_{RT}$	218	$V_{TN}$	126	$V_{RT}$	217	$V_{TN}$	125
	Carga 1	$V_{RS}$	217	$V_{RN}$	125	$V_{RS}$	217	$V_{RN}$	125
		$V_{ST}$	218	$V_{SN}$	125	$V_{ST}$	217	$V_{SN}$	124
		$V_{RT}$	217	$V_{TN}$	126	$V_{RT}$	217	$V_{TN}$	125
	Carga 2	$V_{RS}$	217	$V_{RN}$	125	$V_{RS}$	216	$V_{RN}$	124
		$V_{ST}$	217	$V_{SN}$	125	$V_{ST}$	215	$V_{SN}$	124
		$V_{RT}$	218	$V_{TN}$	126	$V_{RT}$	216	$V_{TN}$	123
	Carga	Primario				Secundario			
		$I_L$ (A)		$I_F$ (A)		$I_L$ (A)		$I_F$ (A)	
Corriente	Vacío	$I_R$	0.1	$I_R$	0.1	$I_R$	0	$I_R$	0
		$I_S$	0.1	$I_S$	0.1	$I_S$	0	$I_S$	0
		$I_T$	0.1	$I_T$	0.1	$I_T$	0	$I_T$	0
	Carga 1	$I_R$	0.4	$I_R$	0.4	$I_R$	0.4	$I_R$	0.4
		$I_S$	0.5	$I_S$	0.5	$I_S$	0.4	$I_S$	0.4
		$I_T$	0.4	$I_T$	0.4	$I_T$	0.4	$I_T$	0.4
	Carga 2	$I_R$	0.9	$I_R$	0.9	$I_R$	0.9	$I_R$	0.9
		$I_S$	1	$I_S$	1	$I_S$	0.9	$I_S$	0.9
		$I_T$	0.9	$I_T$	0.9	$I_T$	0.8	$I_T$	0.8

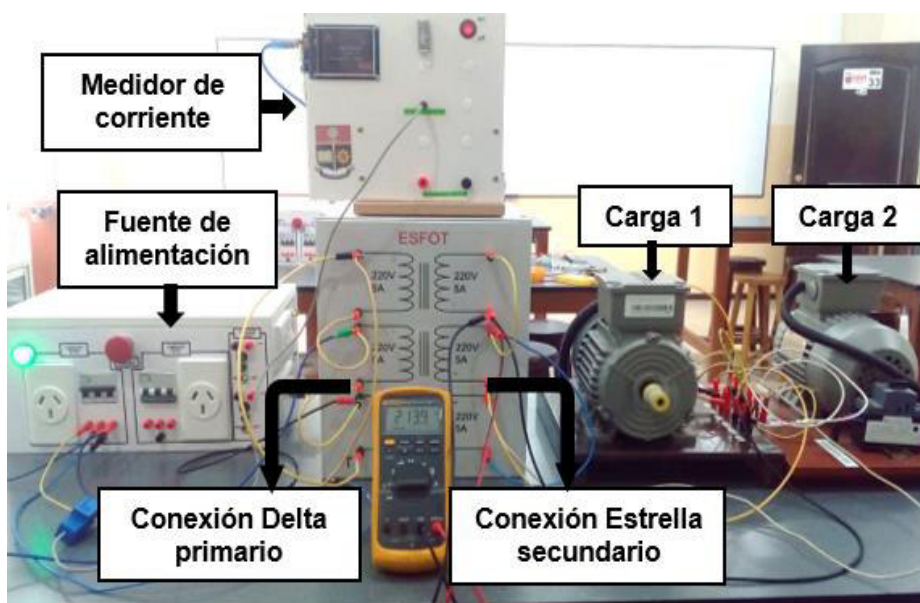


Los voltajes de línea de entrada son aproximadamente iguales a los voltajes de línea de la salida dependiendo de la cantidad de cargas; además, el voltaje de fase es la división del voltaje de línea entre  $\sqrt{3}$ . Las corrientes de línea y de fase son iguales.

### Conexión Delta-Estrella ( $\Delta$ -Y)

La conexión Delta-Estrella se la ha realizado en el módulo T1 siguiendo el diagrama de conexión de la Figura 3.16 de la sección 3.1; en el cual, se ha identificado los puntos de polaridad del módulo que ayudan a realizar la conexión Delta en el primario y Estrella en el secundario como se observa en la Figura 3.42.

En la Figura 3.42 se observa los elementos e instrumentos de medida que son utilizados en esta configuración.



**Figura 3.42** Conexión Delta-Estrella del módulo T1.

Para verificar las corrientes que entran y salen del módulo se ha conectado los dos motores en paralelo en la configuración Estrella. Los pasos de carga realizados son en vacío, con carga 1 y con carga 2 y los resultados obtenidos se los puede observar en la Tabla 3.14.

**Tabla 3.14** Resultados de la conexión Delta-Estrella.

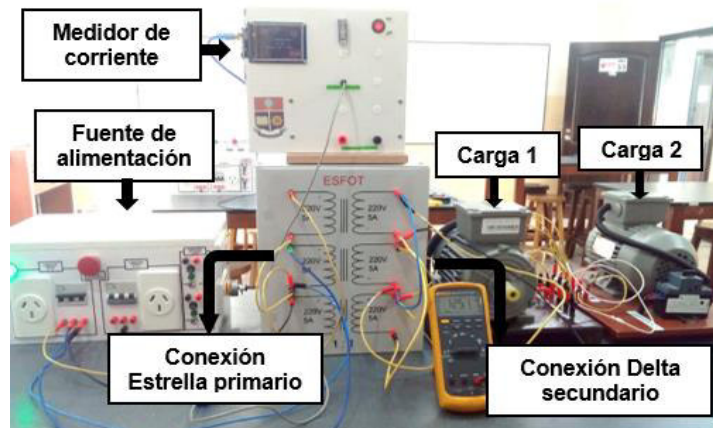
Conexión Delta-Estrella Módulo T1									
	Carga	Primario				Secundario			
		V <sub>L</sub> (V)		V <sub>F</sub> (V)		V <sub>L</sub> (V)		V <sub>F</sub> (V)	
Voltaje	Vacío	V <sub>RS</sub>	216	V <sub>RS</sub>	216	V <sub>RS</sub>	375	V <sub>RN</sub>	215
		V <sub>SR</sub>	218	V <sub>SR</sub>	218	V <sub>SR</sub>	378	V <sub>SN</sub>	218
		V <sub>RT</sub>	218	V <sub>RT</sub>	218	V <sub>RT</sub>	372	V <sub>TN</sub>	216
	Carga 1	V <sub>RS</sub>	217	V <sub>RS</sub>	217	V <sub>RS</sub>	374	V <sub>RN</sub>	215
		V <sub>SR</sub>	218	V <sub>SR</sub>	218	V <sub>SR</sub>	377	V <sub>SN</sub>	217
		V <sub>RT</sub>	217	V <sub>RT</sub>	217	V <sub>RT</sub>	372	V <sub>TN</sub>	216
	Carga 2	V <sub>RS</sub>	217	V <sub>RS</sub>	217	V <sub>RS</sub>	372	V <sub>RN</sub>	215
		V <sub>SR</sub>	217	V <sub>SR</sub>	217	V <sub>SR</sub>	375	V <sub>SN</sub>	216
		V <sub>RT</sub>	218	V <sub>RT</sub>	218	V <sub>RT</sub>	371	V <sub>TN</sub>	215
	Carga	Primario				Secundario			
		I <sub>L</sub> (A)		I <sub>F</sub> (A)		I <sub>L</sub> (A)		I <sub>F</sub> (A)	
Corriente	Vacío	I <sub>R</sub>	0.4	I <sub>RS</sub>	0.2	I <sub>R</sub>	0	I <sub>R</sub>	0
		I <sub>S</sub>	0.5	I <sub>ST</sub>	0.3	I <sub>S</sub>	0	I <sub>S</sub>	0
		I <sub>T</sub>	0.5	I <sub>RT</sub>	0.2	I <sub>T</sub>	0	I <sub>T</sub>	0
	Carga 1	I <sub>R</sub>	2.1	I <sub>RS</sub>	1.2	I <sub>R</sub>	0.9	I <sub>R</sub>	0.9
		I <sub>S</sub>	2.2	I <sub>ST</sub>	1.3	I <sub>S</sub>	1	I <sub>S</sub>	1
		I <sub>T</sub>	2.2	I <sub>RT</sub>	1.2	I <sub>T</sub>	1	I <sub>T</sub>	1
	Carga 2	I <sub>R</sub>	3.6	I <sub>RS</sub>	2.1	I <sub>R</sub>	1.9	I <sub>R</sub>	1.9
		I <sub>S</sub>	3.9	I <sub>ST</sub>	2.3	I <sub>S</sub>	2	I <sub>S</sub>	2
		I <sub>T</sub>	3.9	I <sub>RT</sub>	2.2	I <sub>T</sub>	1.9	I <sub>T</sub>	1.9

En esta conexión los motores están conectados en Estrella y al ser el transformador de relación 1:1 los voltajes de línea de entrada no son iguales a los voltajes de línea de la salida; ya que, el voltaje de línea reflejado a la salida es el voltaje de línea de la entrada multiplicado por  $\sqrt{3}$ . El transformador cumple con la función de un transformador elevador pues los voltajes de línea a la salida son mayores a los voltajes de línea de la entrada.

### Conexión Estrella-Delta (Y-Δ)

La conexión Estrella-Delta se la ha realizado en el módulo T1 siguiendo el diagrama de conexión de la Figura 3.17 de la sección 3.1; en el cual, se ha identificado los puntos de polaridad del módulo que ayudan a realizar la conexión Estrella en el primario y Delta en el secundario como se observa en la Figura 3.43.

En la Figura 3.43 se observa los elementos e instrumentos utilizados para esta configuración.



**Figura 3.43** Conexión Estrella- Delta del módulo T1.

Para verificar las corrientes que entran y salen del módulo se ha conectado los dos motores en paralelo en la configuración Delta. Los pasos de carga realizados son en vacío, con carga 1 y con carga 2 y los resultados obtenidos se los puede observar en la Tabla 3.15.

**Tabla 3.15** Resultados de la conexión Estrella-Delta.

Conexión Estrella-Delta módulo T1									
	Carga	Primario				Secundario			
		$V_L$ (V)		$V_F$ (V)		$V_L$ (V)		$V_F$ (V)	
Voltaje	Vacío	$V_{RS}$	216	$V_{RN}$	125	$V_{RS}$	125	$V_{RS}$	125
		$V_{ST}$	218	$V_{SN}$	125	$V_{ST}$	125	$V_{ST}$	125
		$V_{RT}$	218	$V_{TN}$	126	$V_{RT}$	126	$V_{RT}$	126
	Carga 1	$V_{RS}$	217	$V_{RN}$	125	$V_{RS}$	125	$V_{RS}$	125
		$V_{ST}$	218	$V_{SN}$	125	$V_{ST}$	125	$V_{ST}$	125
		$V_{RT}$	217	$V_{TN}$	126	$V_{RT}$	126	$V_{RT}$	126
	Carga 2	$V_{RS}$	217	$V_{RN}$	125	$V_{RS}$	124	$V_{RS}$	124
		$V_{ST}$	217	$V_{SN}$	125	$V_{ST}$	123	$V_{ST}$	123
		$V_{RT}$	218	$V_{TN}$	126	$V_{RT}$	124	$V_{RT}$	124
Corriente	Carga	Primario				Secundario			
		$I_L$ (A)		$I_F$ (A)		$I_L$ (A)		$I_F$ (A)	
	Vacío	$I_R$	0.5	$I_R$	0.5	$I_R$	0	$I_{RS}$	0.2
		$I_S$	0.4	$I_S$	0.4	$I_S$	0	$I_{ST}$	0.2
		$I_T$	0.3	$I_T$	0.3	$I_T$	0	$I_{RT}$	0.2
	Carga 1	$I_R$	0.5	$I_R$	0.5	$I_R$	0.8	$I_{RS}$	0.4
		$I_S$	0.6	$I_S$	0.6	$I_S$	0.8	$I_{ST}$	0.4
		$I_T$	0.5	$I_T$	0.5	$I_T$	0.8	$I_{RT}$	0.5
	Carga 2	$I_R$	1	$I_R$	1	$I_R$	1.6	$I_{RS}$	0.8
		$I_S$	1.2	$I_S$	1.2	$I_S$	1.6	$I_{ST}$	0.9
		$I_T$	1.1	$I_T$	1.1	$I_T$	1.6	$I_{RT}$	0.9

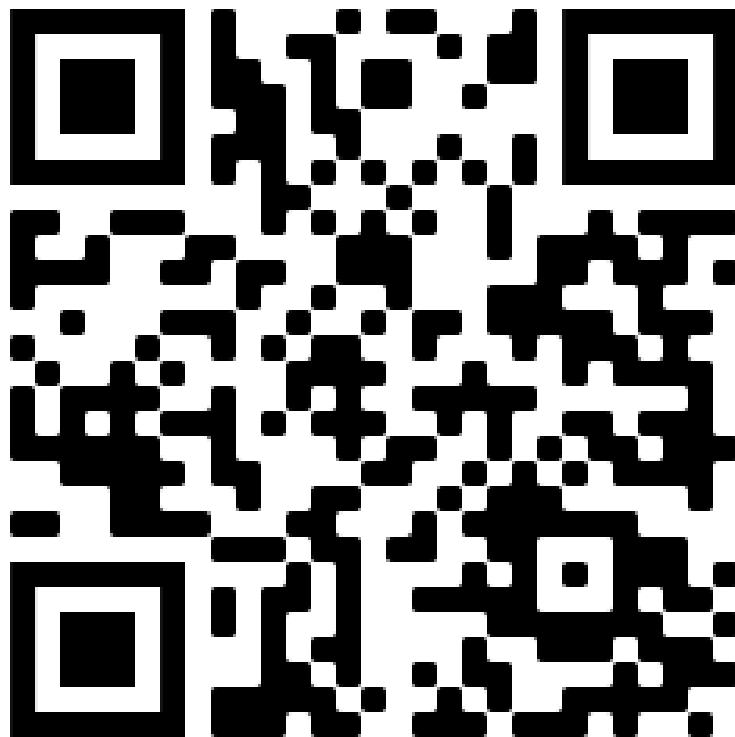
En esta conexión los motores están conectados en Delta. En esta conexión el transformador al ser de relación 1:1 los voltajes de línea de entrada no son iguales a los voltajes de línea de salida, pues, el voltaje de línea de la salida es igual al voltaje de línea de entrada dividido para  $\sqrt{3}$ . De esta forma se cumple la función de un transformador reductor.

### **3.5 Hojas Guía para prácticas de laboratorio**

Se ha realizado una hoja guía en relación a lo escrito en este proyecto, la misma que se encuentra en el Anexo 5.

### **3.6 Manual de Uso y Mantenimiento**

En esta sección se ha realizado un video explicativo, donde, se menciona el uso de los módulos y su respectivo mantenimiento, en la Figura 3.44 se anexa el código QR que dirige a la ubicación del video.



**Figura 3.44** QR del manual de uso y mantenimiento de los módulos.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- En el presente proyecto se logró realizar una revisión teórica completa y necesaria para la construcción de los cuatro módulos didácticos de transformadores para aplicaciones trifásicas; la teoría encontrada ayudó a determinar los requerimientos necesarios, proceso de diseño, dimensionamiento, criterios trifásicos y fórmulas necesarias para comprender el principio de funcionamiento de un transformador trifásico.
- Para la construcción del transformador trifásico el parámetro más importante es definir la potencia aparente del transformador en base a la potencia requerida por la carga, ya que, a partir de este valor se puede arrancar con el dimensionamiento del transformador y así determinar la sección del núcleo magnético, dato que posteriormente es necesario para los demás cálculos de dimensionamiento.
- Actualmente, en el mercado existen carretes especialmente para transformadores trifásicos, sin embargo, el costo es elevado y su disponibilidad es poco común, además, debido a que en el presente proyecto fue necesario adaptar chapas monofásicas para obtener chapas trifásicas a la medida requerida; se optó por fabricar carretes de plástico gracias a sus excelentes características aislantes y maniobrabilidad en la construcción, obteniéndose buenos resultados en las pruebas realizadas.
- Los fusibles han sido dimensionados en función de la corriente nominal que soporta el módulo, para garantizar la seguridad y la vida útil del transformador frente a la presencia de fallas eléctricas o fallas de operación, que se puedan presentar en las prácticas de laboratorio.
- Se realizaron las pruebas de polaridad, que determinaron las marcas en los terminales de cada uno de los módulos, esto con el fin de que los estudiantes que realicen las prácticas de laboratorio puedan referenciarse en este documento.
- En el proceso de pruebas de circuito abierto y cortocircuito a los transformadores, en primera instancia, las pérdidas en los módulos T3 y T4 resultaron mayores en una 25% respecto a las pérdidas en los módulos T1 y T2; por lo cual, se procedieron a verificar las características constructivas de los transformadores, donde, se detectó que las chapas magnéticas no se

encontraban acopladas de manera precisa, sino que presentaban pequeños espacios entre sí, por lo tanto, fue necesario volver a armar los núcleos de los módulos T3 y T4 para corregir los desperfectos; posteriormente, se obtuvieron características similares en los cuatro módulos. Luego, se volvió a realizar las pruebas de circuito abierto y cortocircuito, donde, se precisó una eficiencia de alrededor del 92 % en cada transformador a potencia nominal, valor aceptable en referencia a lo previsto en el inicio del proyecto.

- En las pruebas de conexiones trifásicas, donde, las cargas constituyen dos motores trifásicos de inducción de  $\frac{1}{4}$  de (HP) a 1.5 (A). Se obtuvieron corrientes inferiores a la corriente nominal del transformador establecido en 5 (A), donde, en las configuraciones Delta-Delta y Delta-Estrella se obtuvieron valores más cercanos a intensidad nominal. Por lo tanto, cada módulo puede operar con dos motores de las características mencionadas sin ningún contratiempo.
- Se creó un video del manual de uso y mantenimiento de los módulos para que los usuarios usen como referencia para poner en funcionamiento a los transformadores y a la vez dar su respectivo mantenimiento. El acceso a este material se obtiene mediante el escaneo del código QR que se encuentra en el capítulo 3 en la sección 3.6 del presente documento.

## 4.2 Recomendaciones

- En la parte constructiva del transformador se debe verificar que las chapas magnéticas se encuentren lo más compactas posibles; pues, cualquier espacio no rellenado representa pérdidas por acción del núcleo, además, puede presentar ruido excesivo al conectar a la fuente de voltaje si las chapas magnéticas se encuentran flojas.
- El transformador al ser de relación 1:1 el número de vueltas en los devanados tanto primarios como secundarios del presente proyecto necesitan estar con el mismo número de vueltas para cumplir con la relación; sin embargo, es recomendable que el lado secundario se exceda en 2 o 3 vueltas para compensar la caída de tensión en el conductor.
- En el uso de los módulos para operar motores trifásicos, es importante considerar que, estos posean su elemento de protección (guarda motor), debido a que, al superar la corriente nominal en un porcentaje muy pequeño los fusibles del transformador podrían seguir conduciendo corriente debido a su tolerancia y esto podría causar recalentamiento a las bobinas de los motores. En todo caso es recomendable no sobrepasar los valores nominales del transformador.

- Para determinar los parámetros de forma precisa, es necesario contar con instrumentos especializados y de buena precisión para medir las variables eléctricas y aproximarse en los cálculos, lo más cercano posible a un transformador real.
- En relación con las prácticas que se realizarán en los módulos se debe verificar la continuidad en los devanados; pues, puede existir la pérdida de algún fusible o la desconexión de algún cable interno.
- Para repotenciar los módulos se recomienda agregar un sistema de medición que permita obtener las variables eléctricas más importantes como voltaje, corriente, potencia y factor de potencia.
- Usando los parámetros del transformador determinados en este proyecto se podría simular el comportamiento del transformador de manera virtual antes de ser implementado en el laboratorio. Usando algún software de simulación como por ejemplo MATLAB.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Á. Pulido, *Cálculo Fácil de Transformadores y Autotransformadores, Monofásicos y Trifásicos de Baja Tensión*. Mexico D.C, 2009.
- [2] B. S. Guru en H. R. Hiziroglu, *Máquinas Eléctricas y Transformadores*, Tercera Ed. México DF: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2003.
- [3] M. Mago G en L. Hurtado, “Estudio de la chapa de acero al silicio para el núcleo del transformador monofásico”, vol 16, no 2, bll 65–69, Aug 2009, Toegang verkry: Jul 26, 2021. [Online]. Available at: <https://www.redalyc.org/pdf/707/70717501010.pdf>.
- [4] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, Quinta Edi. México DF: McGraw-Hill, 2012.
- [5] Transformadores, “Modelamiento de un Transformador”, 2005.
- [6] Electron, “Relación de Transformación”, bll 23–25, 2014.
- [7] E. Almagro en J. Narváez, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS AUTOMATIZADO PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN”, 2013.
- [8] V. H. Y. Salazar, “ELABORAR UN MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES”, Escuela Politécnica Nacional, 2010.
- [9] J. L. Jiménez, “Electronicos”. <https://www.comunidadelectronicos.com/articulos/transformadores.htm>.
- [10] M. Espino, “CONDUCTORES, AISLADORES, SEMICONDUCTORES, SUPERCONDUCTORES ELÉCTRICOS”, Cajamarca, 2019. Toegang verkry: Jul 26, 2021. [Online]. Available at: <https://bit.ly/2VcWUiq>.
- [11] H. D. Vallejo, “Cálculo de transformadores”, *Saber Electron.*, bl 6.
- [12] C. M. Q. Mamani, *Construcción de las bobinas del Transformador*. 2019.



